



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria de l'Energia**

**ESTUDI I CARACTERITZACIÓ DEL SISTEMES DE  
SUBMINISTRAMENT DE COMBUSTIBLES ALTERNATIUS I EL  
SEU EMMAGATZEMANT EN TRANSPORT HEAVY-DUTY**



**Memòria i Annexos**

<b>Autora:</b>	Margalida Capó Tous
<b>Director:</b>	Carlos Ruiz Moya (UPC)
<b>Co-Director:</b>	Xavier Ribas Olaya (EVARM INNOVACIÓ SL)
<b>Convocatòria:</b>	Juny de 2019



## Resum

Els vehicles amb motor de combustió interna –MCI en edavant- són uns dels principals generadors de partícules nocives i emissors de  $\text{CO}_2$  i  $\text{NO}_x$ . En el cas del transport pesat per carretera, conegut com Heavy Duty Vehicle (HDV), segons l'Agència Europea de Medi Ambient, és el responsable del 27% d'emissions de diòxid de carboni. Cada cop més, s'imposen normes més restrictives que afecten a les emissions i per poder complir-les s'intenten trobar alternatives com per exemple la tecnologia dual-fuel, barrejar dièsel amb altres combustibles fòssils (GLP, GNC, GNL, entre d'altres) però que generen menys gasos d'emissió en el seu procés de combustió.

En aquest projecte es realitza un estudi de la tecnologia dual-fuel barrejant dièsel amb gas líquid del petroli (GLP). Es realitza un disseny del sistema per obtenir una correcta barreja dels dos combustibles abans d'entrar a la cambra de combustió d'un MCI. També es proposa un sistema pel retorn del combustible no utilitzat en la combustió. A més, s'estudia de manera teòrica la viabilitat del sistema i la resposta en cada moment de la mescla dels combustibles que es troba exposada a diferents pressions, temperatures i composicions.

## Resumen

Los vehículos con motor de combustión interna (MCI) son uno de los principales generadores de partículas y emisores de  $\text{CO}_2$  i  $\text{NO}_x$ . En el caso del transporte pesado por carretera, conocido como Heavy Duty Vehicle (HDV), según la Agencia Europea de Medio Ambiente, es el responsable del 27% de emisiones de dióxido de carbono. Cada vez más, se imponen normas más restrictivas que afectan a las emisiones y para poder cumplir estas, se intentan encontrar alternativas como por ejemplo la tecnología dual-fuel, mezclar diesel con otros combustibles fósiles (GLP, GNC, GNL, entre otras) pero que generan menos gases de emisiones en su proceso de combustión.

En este proyecto se realiza un estudio de la tecnología dual-fuel mezclando diesel con gas licuado del petróleo (GLP). Se realiza un diseño del sistema para obtener el correcto mezclado de los dos combustibles antes de entrar en la cámara de combustión de un MCI. También se propone un sistema para el retorno del combustible no utilizado en la combustión. Además, se estudia de manera teórica la viabilidad del sistema y la respuesta en cada momento de la mezcla de los combustibles que se encuentra expuesta a diferentes presiones, temperaturas y composiciones.

## Abstract

Vehicles with internal combustion engine (MCI) are one of the main generators of harmful particles, and CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emitters. In the case of heavy duty transport (HDV), according to the European Environment Agency, it is responsible for 27% of carbon dioxide emissions. More restrictive regulations are imposed that affect emissions and in order to meet these, they try to find alternatives such as dual-fuel technology: mix diesel with other fossil fuels (LPG, GNC, LNG, among others) but that generate less emission gases in their combustion process.

In this project, a study of the dual-fuel mixing technology diesel with liquefied petroleum gas (GLP) is carried out. A system for the correct mixture of the two fuels before entering the combustion chamber of a MCI is designed. A system is also proposed for the return of fuel not used in combustion. In addition, the theoretical study of the feasibility of the system and the response at every moment of the mixture of fuels that is exposed to different pressures, temperatures and compositions.



## Agraïments

En primer lloc m'agradaria donar les gràcies al director del projecte, Carlos Ruiz, per donar-me l'oportunitat de realitzar aquest treball i per guiar-me i ensenyar-me durant el camí. També al co-director Xavier Ribas i l'empresa *Evarm* per confiar aquesta idea a les meves mans.

Finalment, agrair d'una manera molt especial a Joana, Antoni, Marina i Francesca per encoratjar-me i donar-me suport durant els quatre anys de formació i que sense ells res d'això hauria estat possible.



## Glossari

*Ar – Argó*

*CH<sub>4</sub> - Metà*

*C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - Età*

*C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – Propà*

*C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – Butà*

*C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> – Pentà*

*CO<sub>2</sub> – Diòxid de carboni*

*CR – Common Rail*

*ECU – Centraleta o Unitat de Control Electrònica*

*EGR – Exhaust Gas Recirculation*

*EPA – Environmental Protection Agency*

*GER – Percentatge de substitució del combustible*

*GHG – Green House Gas*

*GLP – Gas Liquefiet del Petrol*

*GNC – Gas Natural Comprimet*

*GNL – Gas Natural Liquefiet*

*H<sub>2</sub> - Hidrogen*

*He – Heli*

*HDV – Heavy Duty Vehicle*

*HP - High Pressure*

*Kr – Criptó*



*MCI - Motor de Combustió Interna*

*N<sub>2</sub> – Nitrogen*

*Ne – Neó*

*O<sub>2</sub> – Oxigen*

*PCI – Poder calorífic inferior*

*PCS – Poder calorífic superior*

*PCV – Positive Crankcase Ventilation*

*PMI – Punt mort inferior*

*PMS – Punt mort superior*

*RAC – Relació Aire Combustible*

*ULS – Ultra Low Sulfur*

*Xe – Xenó*

## **Símbols**

*f – Factor de fricció*

*g – Gravetat (9,81 m/s<sup>2</sup>)*

*h – Altura*

*h – Entalpia*

*L - Longitud*

*M – Pes molar*

*$\dot{m}$  - Cabal màssic*

*n<sub>tubs</sub> – Nombre de tubs*



$n_{\text{orificis}}$  – Nombre d'orificis

$P$  – Pressió

$PC$  – Poder calorífic

$\Delta P$  – Pèrdua de càrrega

$Re$  – Nombre Reynolds

$s$  – Entropia

$T$  – Temperatura

$v$  – Velocitat

$\dot{V}$  – Cabal volumètric

$x$  – Fracció molar

$y$  – Fracció màssica

$\rho$  – Densitat

$\mu$  – Viscositat

$\alpha$  – Constant empírica model Shu



# Índex.

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>V</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>1</b>
1.1. Motivació	1
1.2. Objectius i abast del projecte	1
<b>2. INDÚSTRIA DEL PETROLI I DEL GAS</b>	<b>3</b>
2.1. Productes extrets	4
2.2. Impacte ambiental	5
2.3. Futura escassetat	7
<b>3. EMISSIONS</b>	<b>10</b>
3.1. Emissions en els fums	11
3.2. Emissions procedents del transport pesat	12
3.3. Normativa sobre emissions contaminants dels vehicles	14
3.3.1. Normativa europea	14
3.3.2. Espanya	15
<b>4. MOTOR DE COMBUSTIÓ INTERNA (MCI)</b>	<b>17</b>
4.1. Parts d'un MCI	17
4.2. Funcionament d'un MCI	21
4.3. Cicle <i>Otto</i>	21
4.4. Cicle dièsel	22
4.4.1. Sistema <i>Common-Rail</i>	25
<b>5. SISTEMA DUAL-FUEL</b>	<b>27</b>
5.1. Antecedents	27
5.2. Avantatges i inconvenients respecte un motor dièsel	28
5.3. Funcionament actual del sistema Dual – Fuel	28

5.4. Gas Liquefiet Petrol (GLP) .....	30
<b>6. SISTEMA DE DISENY .....</b>	<b>33</b>
6.1. Mescla dels combustibles .....	36
6.1.1. Percentatge de substitució del combustible (GER).....	36
6.1.2. Mesclador .....	38
6.2. Sistema d'injecció.....	49
6.3. Combustió .....	54
6.3.1. Aportació d'aire .....	54
6.3.2. Relació aire combustible estequiomètrica (RAC).....	55
6.3.3. Methane Number.....	57
6.4. Separació dels combustibles.....	58
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>62</b>
<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>63</b>
Costos d'enginyeria.....	63
Materials .....	64
Cost total .....	64
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>65</b>
Referències bibliogràfiques .....	65
Bibliografia complementària .....	66
<b>ANNEX A: DIAGRAMES TERMODINÀMICS .....</b>	<b>67</b>



# 1. Introducció

## 1.1. Motivació

Aquest projecte de final de grau sorgeix degut a que l'empresa Evarm decideix obrir una nova línia d'investigació sobre la tecnologia dual-fuel. L'empresa, juntament amb el professor Carlos Ruiz, em varen donar l'oportunitat de participar en aquest projecte enfocat a un tema totalment desconegut per a mi. L'objecte d'estudi em va parèixer molt interessant i també important per la situació actual en la que es troba el transport. Per mi suposava un gran repte realitzar un estudi d'aquesta complexitat i sobre una branca no estudiada en el Grau d'Enginyeria de l'Energia.

L'evolució humana i l'augment exponencial de la població provoquen un augment desproporcionat d'emissions. En la última dècada a tot el món, ha sorgit un moviment de conscienciació pel canvi climàtic que ha promogut l'estudi de fonts d'energia alternatives i la implantació de tecnologies més sostenibles. Un dels sectors que més emissions emet és el sector del transport, i conseqüentment també és un dels que més transformacions tecnològiques sofreix. Sempre he estat una persona molt involucrada amb el medi ambient i disposada a contribuir per canviar aquesta situació. Així doncs, aquest treball, també sorgeix de les ganes de participar en l'estudi d'una solució més sostenible pel sector del transport pesat.

## 1.2. Objectius i abast del projecte

El cotxe és el transport que ha sofert més innovacions i actualment s'aposta per cotxes híbrids, elèctrics o d'hidrogen, entre d'altres tecnologies emergents, que actualment ja es troben en el mercat i en les carreteres. En el cas del transport pesat per carretera (HDV), trobar una alternativa al dièsel és més complicat degut al seu requeriment de gran potència, càrrega transportada i autonomia. És per això que s'estudia la viabilitat d'altres tecnologies com per exemple la tecnologia dual-fuel: substituir dièsel per altres combustibles fòssils (GLP, GNC, GNL) però que generen un procés de combustió més net i amb menys gasos d'emissió.

Aquest treball té dos objectius primordials, primer realitzar un estudi de mètodes per barrejar adequadament dos combustibles abans d'entrar a la cambra de combustió d'un motor de combustió interna (MCI), i un segon dissenyar el sistema de retorn del combustible no utilitzat en la combustió. El sistema disposarà de dos tancs d'emmagatzematge, un de dièsel i un altre de gas líquid del petroli (GLP) que ambdós combustibles es trobaran en fase líquida; caldrà determinar la quantitat de cada combustible juntament amb les seves característiques de temperatura, pressió i percentatge de fase

líquida òptimes per a la seva correcta mescla i combustió. A més, també s'estudiarà el comportament de la mescla dels dos combustibles en les diferents fases per les que passa i en les que es troba exposada a diferents pressions, temperatures i composicions.



## 2. Indústria del Petrol i del Gas

La indústria del petrol i del gas, també coneguda en el món anglosaxó com *Oil & Gas Industry*, es considera una de les més importants del sector primari en termes econòmics globals, inclou els processos globals d'exploració, extracció, refinació, transport (sovint per petroliers i canonades), i comercialització de productes petrolífers. Els productes de major volum de la indústria són el petrol i la gasolina. El valor monetari extrem del petrol i els seus productes han portat a ser conegut com "or negre". Normalment, la indústria es divideix en tres sectors principals:

- *Upstream*. Exploració i producció.
- *Midstream*. Transport, processos i emmagatzematge.
- *Downstream*. Refinament, venda i distribució.

El petrol és vital per a moltes indústries, i és necessari per al manteniment de la civilització industrial en la seva configuració actual, cosa que la converteix en una preocupació crítica per a moltes nacions. El petrol representa un gran percentatge del consum energètic mundial.

Alguns governs, com el govern dels Estats Units, aporten un gran subsidi públic a les empreses petrolieres, amb grans desgravacions fiscals en pràcticament totes les etapes de l'exploració i l'extracció d'hidrocarburs, inclosos els costos dels arrendaments i equips de perforació de petrol.

En els últims anys, les tècniques de recuperació de petrol millorades, especialment la perforació de múltiples escenaris i la fractura hidràulica (*fracking*), s'han situat a l'avantguarda de la indústria ja que aquesta nova tecnologia juga un paper crucial i controvertit en els nous mètodes d'extracció del petrol. No obstant això, en els darrers anys s'ha produït un creixent sentiment negatiu cap a la indústria del petrol i del gas i la "gran energia". Desastres mediambientals importants, com el vessament de petrol de la plataforma d'extracció *Deepwater Horizon Gulf of Mexico* a l'any 2013, han donat un punt de vista negatiu a la indústria. Juntament amb l'augment de la legislació pro-eco i la pressió governamental han fet que la indústria del petrol i el gas estiguin sota més escrutini públic que mai.

El col·lapse de preus de l'any 2014 ha deixat la indústria en un estat de desacceleració. Aquest xoc es va produir per diversos motius, però el principal regulador és la relació entre l'oferta i la demanda. Els països en desenvolupament, com ara la Xina, el Brasil i Rússia, van demostrar unes necessitats incessants de petrol durant la primera dècada del nou mil·lenni, però, a l'any 2010, la trajectòria ascendent de les seves economies va començar a parar, deixant un gran buit en el consum mundial de petrol. Mentrestant, els EUA van produir 3,5 milions de barrils de petrol al dia, i això es va agreujar amb el canvi en la demanda que va provocar fluctuacions massives dels preus del petrol.

## 2.1. Productes extrets

El petroli, el gas natural i l'aigua que es troben en els reservoris de petroli o de gas s'anomenen fluids reservoris. Soterrats milers de metres per sota de la superfície terrestre, els líquids del reservori en un estat subterrani primitiu estan sotmesos a un ambient d'alta pressió i alta temperatura. L'alta pressió permet que el petroli cru es dissolgui en un gran volum de gas, de manera que les propietats físiques dels líquids de l'embassament subterrani són molt diferents dels que estan fora.

En totes les estructures es troba que el gas natural, sempre que existeixi, s'acumula en la part superior del reservori, a continuació va el petroli i encara més profund, l'aigua, salina en la majoria dels casos. Les interfícies limitants gas-petroli i petroli-aigua són habitualment horitzontals. Les roques impermeables són les encarregades de delimitar el reservori de l'exterior. En la Figura 2.1 es veu representat un reservori petrolífer.

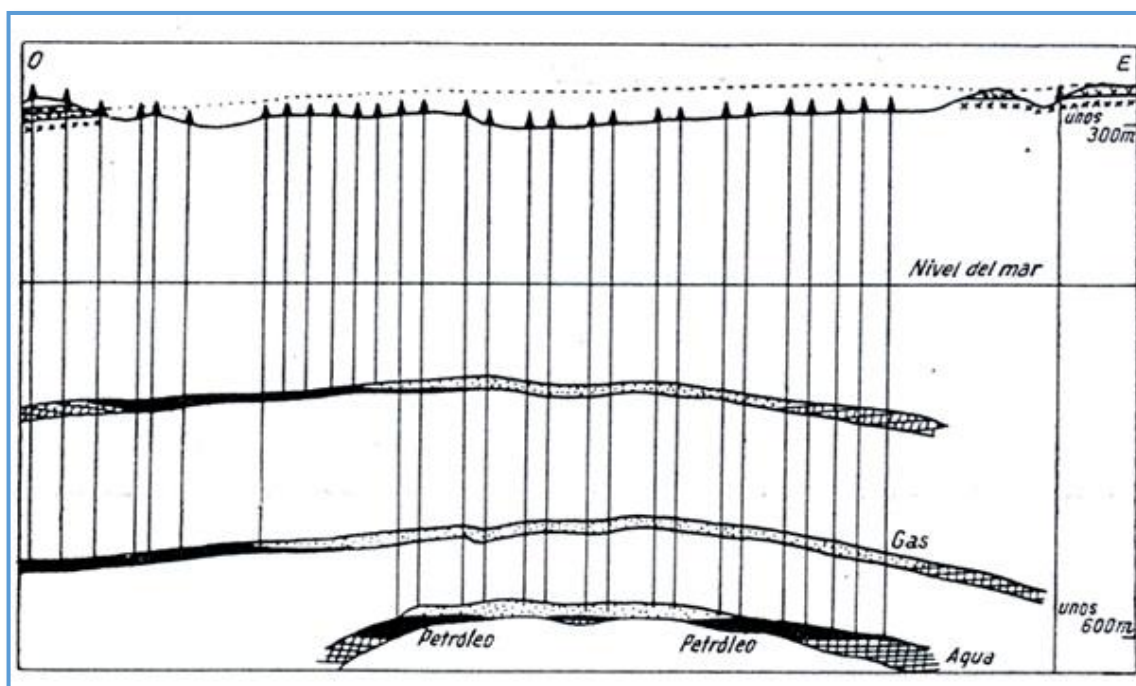


Figura 2.1. Jaciment petrolífer. [1]

El petroli és una barreja d'hidrocarburs naturals, que poden existir en estats sòlids, líquids o gasosos depenent de les condicions de pressió i temperatura del reservori. Per poder ser utilitzat en les diferents indústries i, especialment, en motors de combustió ha de sofrir una sèrie de tractaments i transformacions per la obtenció del major nombre de productes d'alt valor comercial. El conjunt d'aquests tractaments constitueixen el procés de refinament del petroli.

El petroli natural no s'usa com s'extreu de la natura, sinó que es separa en barreges més simples d'hidrocarburs que tenen usos específics. A aquest procés se'l coneix com destil·lació fraccionada. El petroli natural bullent (a uns 400 °C) s'introdueix a la part baixa de la torre de destil·lació o fraccionament; les substàncies més volàtils que s'evaporen a aquesta temperatura passen com vapors a la càmera superior, on es refreden i es condensen, mentre que les fraccions més pesades queden a les zones inferiors. D'aquest procés s'obtenen les següents fraccions:

- Gasos: metà,età i els gasos líquuats del petroli (propà i butà).
- Nafta, ligroïna o èter de petroli.
- Gasolina.
- Querosè.
- Gasoil.
- Fueloil.
- Olis i lubricants.
- Asfalt.
- Quitrà.

## 2.2. Impacte ambiental

Algunes operacions de la indústria petroliera han provocat un gran impacte ambiental. La contaminació pel petroli es produeix pel seu alliberament accidental o intencionat en l'ambient, provocant efectes adversos sobre els humans, els animals o sobre el medi, directe o indirectament. La contaminació involucra totes les operacions relacionades amb la explotació, el transport d'hidrocarburs, que condueixen inevitablement al deteriorament gradual del medi ambient. Afecta de manera directa a la terra, l'aigua, l'aire i la fauna i flora. [2]

Els efectes sobre el terra es deuen al desbrossament i allisat del terreny i al desplaçament i operació d'equips pesats. Els vessaments de petroli i les deixalles produeixen una alteració del substrat original en el què creixen les espècies vegetals deixant terres inutilitzables durant anys.

La contaminació d'aigües es produeix a causa de les deixalles o productes derivats de la refinació i també de vessaments de petroli, que tenen com a conseqüència la disminució del contingut d'oxigen, aportament de sòlids i de substàncies orgàniques i inorgàniques. En el cas de les aigües subterrànies el major deteriorament es manifesta en un augment de la salinitat, per contaminació de les capes freàtiques amb l'aigua de producció de petroli d'alt contingut salí.

La combustió dels combustibles fòssils produeix gasos d'efecte hivernacle (GHG) i altres contaminants de l'aire, ja que a l'hora d'extreure un hidrocarbur líquid aquest sempre va acompanyat amb gas. La

captació del gas està determinada per la relació gas petroli, si aquest valor és alt, el gas és capturat i si és baix és airejat. Entre aquests gasos contaminants expulsats a l'aire hi ha òxids de nitrogen, diòxid de sofre, compostos orgànics volàtils i metalls pesants.

Ara bé, quasi la meitat del petroli i derivats industrials que s'aboquen al mar són residus que bolquen ciutats costaneres. El mar és emprat com un accessible i barat dipòsit de substàncies contaminants. Altres vessaments es deuen a accidents que pateixen els grans vaixells contenidors de petroli, que per negligència transporten el combustible en condicions inadequades. De qualsevol manera, els vessaments de petroli representen una de les majors causes de la contaminació oceànica. Aquests fan malbé els ecosistemes marins poden arribar a produir:

- La mort dels organismes per asfíxia, enverinament, i per exposició als components tòxics del petroli solubles en aigua.
- La destrucció dels organismes joves o recent nascuts.
- La disminució de la resistència o augment d'infeccions en les espècies.
- Efectes negatius sobre la reproducció i propagació de la fauna i flora marina.
- La destrucció de les fonts alimentàries de les espècies superiors.
- La incorporació de carcinògens a la cadena alimentària.

Els vessaments de petroli es manifesten més dramàticament en les aus, tant que la majoria d'efectes és possible apreciar-los a simple vista. Poden produir hipotèrmia, efectes subletals, ceguera i dificultat per volar.

El petroli també pot entrar en contacte amb els humans a través de tres formes: la absorció per la pell, la ingestió de menjar o beguda i la inhalació a través de la respiració. L'exposició al petroli no està limitada a l'àrea propera a la contaminació. Quan el petroli contamina el medi ambient, els components més pesats tendeixen a dipositar-se en els sediments des d'on poden contaminar repetidament les fonts d'aigua potable o ser consumits per organismes que poden entrar en la cadena alimentària de la espècie humana. Els components del petroli més lleugers poden evaporar-se en qüestió d'hores i ser dipositats a gran distància del seu lloc de producció a través de l'aire o de l'aigua. Els efectes que poden tenir per exposició aguda són irritació de la pell o dels ulls, marejos, mals de caps o nàusees. La inhalació d'olis minerals pot arribar a causar una pneumònia lipoide i, en darrera instància, la mort. Altes concentracions de benzè causen símptomes neurotòxics i poden arribar a ser causa de leucèmia i probablement altres tumors hematològics.

### 2.3. Futura escassetat

El petroli és un recurs natural no renovable, la indústria s'enfronta a un inevitable esgotament de les reserves de petroli al món. La Revista Estadística d'Energia Mundial de 2016 editada per la companyia BP (*The BP Statistical Review of World Energy 2016*) va calcular la proporció entre reserves de petroli i producció tenint en compte les reserves mundials provades [3]. Segons aquest estudi, la vida útil esperada de les reserves és de 115 anys per la producció del carbó i aproximadament de 50 anys pel petroli i gas natural. El significat del càlcul de la proporció entre les reserves de petroli provades i la producció global és que, mantenint els nivells actuals de producció, i sempre que no es descobreixin noves reserves de petroli, les reserves existents s'esgotaran en els pròxims 50 o 100 anys. A la Figura 2.2 es pot veure els llocs del món on més reserves existeixen: Canadà, Veneçuela i Aràbia Saudita, seguit de Rússia, Irak i Iran.

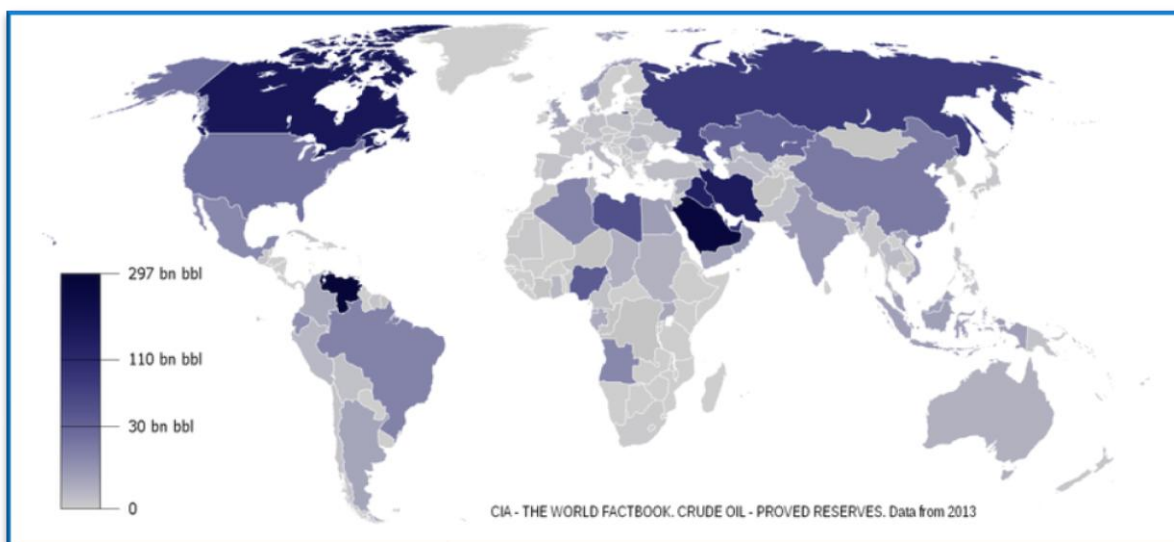


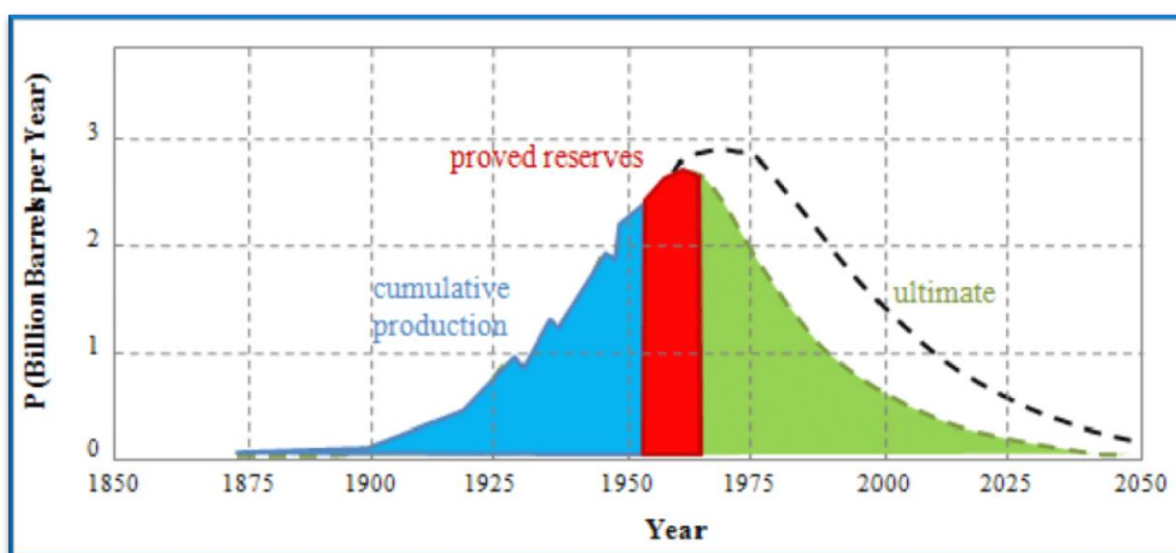
Figura 2.2. Reserva del petroli. [4]

La teoria del pic de Marion King Hubbert és un model amb força acceptació sobre la taxa d'esgotament a llarg termini, tant del petroli com d'altres combustibles fòssils. Prediu que la producció mundial de petroli arribarà al seu zenit i després declinar tan ràpid com va créixer, ressaltant el fet que el factor limitador de l'extracció de petroli és l'energia requerida i no el seu cost econòmic.

Tot i ser controvertida, aquesta teoria és àmpliament acceptada entre la comunitat científica i la indústria petrolera. El debat no se centra en si hi haurà un pic del petroli sinó en quan passarà, ja que és evident que el petroli és un recurs finit i no renovable en escales de temps curtes pel que en un moment o altre s'arribarà al límit d'extracció. Això depèn dels possibles descobriments de noves

reserves, l'augment d'eficiència dels jaciments actuals, l'extracció profunda o l'explotació de noves formes de petroli no convencionals.

Segons la teoria, l'extracció d'un pou qualsevol segueix una corba amb un màxim, zenit de producció, en el seu centre. Arribats a aquest punt cada barril de petroli es fa, progressivament, més car d'extreure fins que la producció deixa de ser rendible al necessitar gastar més quantitat de cru, que el que s'obté d'extreure, és a dir quan es necessita consumir l'equivalent a un barril de petroli, o més per obtenir aquest mateix barril de cru del subsòl. La teoria també observa que, si la corba de producció d'un pou segueix aquesta simple funció gaussiana, la corba de producció de països sencers i, per extensió, la corba mundial segueixen patrons similars. Aquestes són les que es coneixen com corba de Hubbert i es troba representada en la Figura 2.3 tal com va suggerir inicialment Marion King Hubbert.



**Figura 2.3.** Corba de producció del petroli, com suggerí originalment M. King Hubbert en 1956. [5]

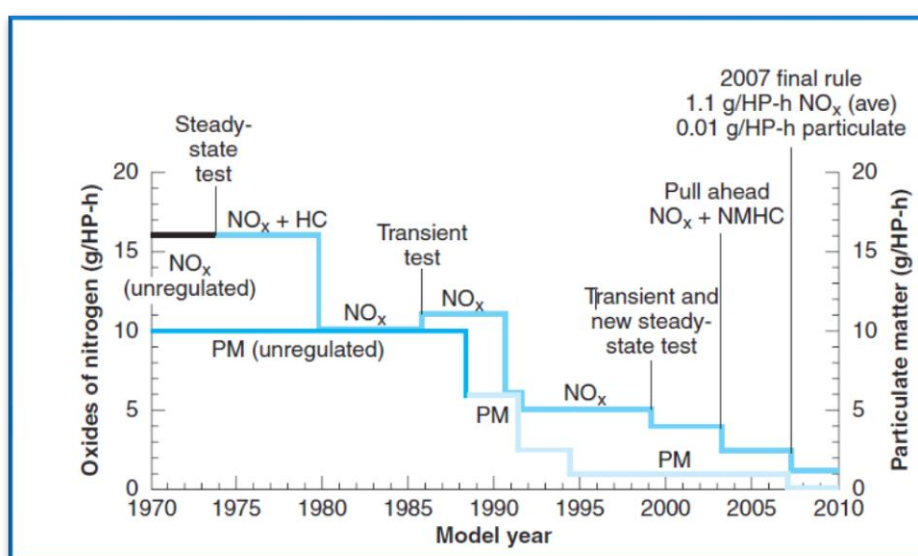
Una de les primeres conseqüències de que el petroli deixi de ser rendible per la seva extracció és que el producte en si es tornaria escàs. Al contrari que en el passat, la escassetat vindria donada per permanents motius naturals i econòmics, i no per qüestions polítiques i temporals. La falta de petroli per abastir la demanda immensa que hi ha dins una societat amb unes grans necessitats energètiques finançades per aquest tipus d'energia podrien generar conflictes socials, atenuats o greus per les mesures que els diferents països puguin o no adoptar a partir del començament de la davallada de la indústria petrolífera. Ara bé, cada país amb reserves petrolíferes declaren aquestes en funció de la situació geopolítica mundial. És per això que no és possible fixar una data d'esgotament concreta i generalitzada.

A més, encara que disposem d'energies renovables per a la producció d'electricitat, encara no és una solució real per substituir la indústria petrolífera ja que aquesta compta amb una potent infraestructura a més de moltes reserves conegudes i d'altres que encara estan per descobrir. Un altre motiu és que les energies renovables presenten reptes com problemes d'emmagatzematge, de distribució i transport, entre d'altres. En el sector del transport actualment no es pot fer una transició completa cap a vehicles elèctrics perquè la xarxa elèctrica no té suficient capacitat de distribució, a més de la baixa autonomia que presenten els vehicles degut a la falta d'un sistema d'emmagatzematge amb més capacitat.

### 3. Emissions

La interacció del transport i medi ambient constitueix una preocupació creixent en el món actual. La demanda de mobilitat i infraestructures creix constantment i amb ella la preocupació ambiental de la societat i el desenvolupament del marc legislatiu.

Abans de la dècada dels anys 90 es centrava més en les emissions produïdes pels nous motors abans de la certificació, però més recentment jurisdiccions estatals i locals han regulat i endurit els estàndards d'emissions, per així reduir-les en gran mesura. Així com es pot comprovar en la Figura 3.1 les emissions de  $\text{NO}_x$  a l'any 1975, quan no es trobaven regulades, eren de 16 g/HP-h, mentre que a l'any 2007 aquestes s'han vist reduïdes fins a 1,1 g/HP-h.



**Figura 3.1.** Evolució emissions motors transport pesat EPA. [6]

Les emissions contaminants dels vehicles són emeses pels seus fums. Hi ha dos tipus de fums: el diòxid de sofre ( $\text{SO}_2$ ) i el fum fotoquímic. [6]

El diòxid de sofre és produït per la crema dels combustibles sulfurosos com el carbó i olis pesats. Avui dia aquests són produïts principalment per la indústria però en la dècada dels anys 80, aproximadament, el combustible dièsel contenia suficient sofre, fet que convertia els camions de propulsió dièsel en productors d'aquestes emissions. No obstant això, amb els anys el sofre en el combustible dièsel s'ha reduït a gairebé a res, de manera que avui dia els vehicles de propulsió amb motor dièsel utilitzen combustibles de sofre ultraviolats (ULS) que contribueixen poc a la formació del diòxid de sofre.



El segon tipus de fum i el més important és el fotoquímic; tots els motors de combustió interna contribueixen a la formació d'aquest fum. El fum fotoquímic es produeix en dues etapes. En primer lloc els hidrocarburs i els òxids de nitrogen procedents de les aixetes de sortida del vehicle reaccionen amb la llum del sol. Això produeix ozó, que aquest comença a reaccionar amb gas d'hidrocarburs per produir fum. L'ozó per si mateix és altament tòxic en baixes concentracions, i el fum que resulta de l'exposició a la llum és un problema important a nivell mundial.

### 3.1. Emissions en els fums

Les emissions expulsades pel tub d'escapament dels vehicles es classifiquen en les següents substàncies químiques:

- Monòxid de carboni (CO). És originat en la combustió incompleta de petroli, carbons, etc... És un gas incolor, inodor, explosiu i altament tòxic. Bloqueja el transport d'oxigen per part dels glòbuls vermells. És mortal, fins i tot en una baixa concentració en l'aire que es respira. En una concentració normal en l'aire ambiental s'oxida a curt temps, formant diòxid de carboni  $\text{CO}_2$ .
- Sofre. Quan s'oxida en la combustió forma diòxid de sofre ( $\text{SO}_2$ ) que propicia les malalties de les vies respiratòries, però intervé només en una mesura molt reduïda en els gasos d'escapament. És un gas incolor, d'olor penetrant, no combustible. Si es redueix el contingut de sofre en el combustible és possible disminuir les emissions de diòxid de sofre.
- Hidrocarburs. Són restes no cremades del combustible, que sorgeixen en els gasos d'escapament després d'una combustió incompleta. La mala combustió pot ser deguda per falta d'oxigen durant la combustió o també per una baixa velocitat d'inflamació. Aquests es manifesten en diferents combinacions i actuen de diferent mode en l'organisme. Alguns d'ells irriten els òrgans sensorials, mentre que altres són cancerígens.
- Les partícules, o pols, segons la mida són sedimentables (majors de  $30\ \mu\text{m}$ ), partícules en suspensió (entre  $10\ \mu\text{m}$  i  $30\ \mu\text{m}$ ), partícules respirables (entre  $1\ \mu\text{m}$  i  $10\ \mu\text{m}$ ) o fums (entre  $0,005\ \mu\text{m}$  i  $0,01\ \mu\text{m}$ ).
- Compostos orgànics volàtils. Són hidrocarburs en estat gasós. Els vehicles amb combustible dièsel els aporten d'una manera petita. El transport és el sector representa aproximadament el 30% d'aquesta substància trobats al voltant dels centres de població.
- Ozó ( $\text{O}_3$ ). És una forma al·lotròpica de l'oxigen molt menys estable que la forma diatòmica ( $\text{O}_2$ ). Es produeix típicament amb el trànsit vehicular intens. És un factor decisiu a l'aparició de boira fotoquímica i els seus efectes (danys severs als conreus, reducció de boscs, irritació de mucoses, problemes respiratoris greus). Els efectes directes que té sobre l'organisme humà encara no estan ben aclarits.

- Òxids de nitrogen (NO i NO<sub>2</sub>). Són combinacions de nitrogen N<sub>2</sub> i oxigen O<sub>2</sub> que es produeixen a l'existir una alta pressió, alta temperatura i excés d'oxigen durant la combustió en el motor. El monòxid de nitrogen (NO), és un gas incolor, inodor i insípid. Al combinar amb l'oxigen de l'aire, és transformat en diòxid de nitrogen (NO<sub>2</sub>), de color marró vermellós i d'olor molt penetrant, provoca una forta irritació dels òrgans respiratoris. Les mesures destinades a reduir el consum de combustible solen conduir lamentablement a un ascens de les concentracions d'òxids nítrics en els gasos d'escapament, perquè una combustió més eficaç produeix temperatures més altes. Aquestes altes temperatures generen al seu torn una major emissió d'òxids nítrics.
- El diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>), produït en les combustions completes de productes orgànics. És un gas incolor, no combustible. A banda de ser un gas no tòxic, redueix l'estrat de l'atmosfera terrestre que sol servir de protecció contra la penetració dels rajos ultravioleta. Aquest és el màxim causant del canvi climàtic.

Tots els motors d'avui dia confien principalment amb computadores per gestionar les emissions a nivells acceptables. El motor dièsel disposa d'una àmplia gamma de dispositius externs de control d'emissió que inclouen catalitzadors d'oxidació, catalitzadors de reducció, filtres de partícules i sistemes d'injecció d'urea. El combustible dièsel ha canviat al llarg dels anys. Els motors dièsel d'avui han d'operar amb combustible ultra baixa de sofre (ULS). Alguns dels dispositius més utilitzats en els motors dièsel actuals per limitar les emissions nocives són els següents:

- Control de la combustió (sonda Lambda).
- Sistema de ventilació positiva del Càrter (PCV).
- Sistema tancat de control evaporatiu (*Canister*).
- Sistema de recirculació de gasos d'escapament (EGR).
- Sistema d'injecció addicional d'aire en l'escapament.
- Convertidor catalític i filtre de partícules.

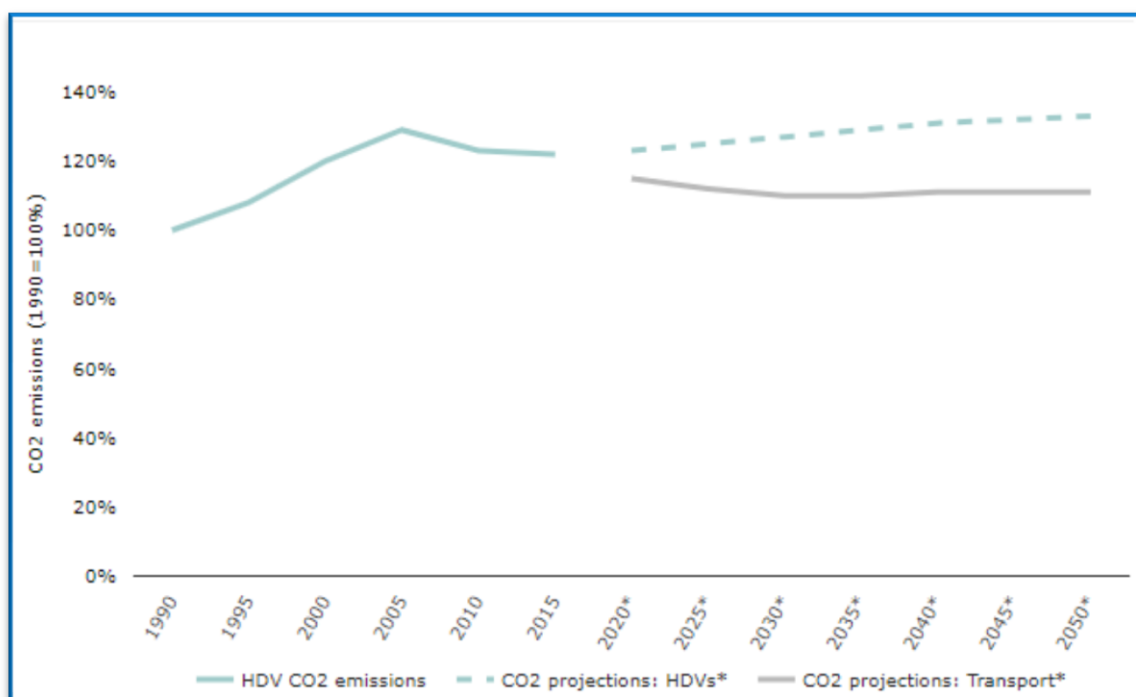
### 3.2. Emissions procedents del transport pesat

La majoria de vehicles que transporten persones i mercaderies per carretera tenen com a combustible algun derivat del petroli. Durant la combustió en el motor es generen gasos i partícules sòlides residuals que s'emeten a l'atmosfera mitjançant el tub d'escapament. El ventall d'aquests contaminants és ampli i entre tots destaquen les partícules, el diòxid de sofre (SO<sub>2</sub>), els òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>), el monòxid de carboni (CO) i els compostos orgànics volàtils (COV).

Segons l'Agència Europea de Medi Ambient, actualment els vehicles de transport pesat són els responsables del 27% d'emissions de diòxid de carboni del transport per carretera [4]. Des del 1990 aquestes emissions s'han incrementat un 25% i es preveu que aquestes segueixin en augment. Les

inscripcions anuals de nous camions van augmentar a la Unió Europea fins a arribar als 380.000 el 2016. Es preveu que es registrin noves inscripcions per augmentar en un 46% aproximadament el 2030, en comparació amb el 2016.

Els vehicles pesats són els responsables aproximadament d'un quart de les emissions de CO<sub>2</sub> provinents del transport i gairebé un 5% de les emissions totals de la Unió Europea. Els països que major contribueixen a aquestes emissions són Alemanya, França, Regne Unit, Itàlia, Espanya i Polònia.



**Figura 3.2.** Emissions de CO2 recollides i previstes del transport pesat. [7]

Les emissions del transport a Espanya en l'any 2014 van ser de 77,2 MTCO<sub>2</sub>-eq, incrementat-se gairebé en un 50% des de l'any 1990 com a conseqüència del increment en la demanda de mobilitat de passatgers i mercaderies. No obstant això, des de l'any 2007 s'ha registrat una disminució de les emissions com a conseqüència de la crisi econòmica i de les mesures de mitigació que s'han posat en marxa en aquest sector.

El sector transport representa el 25% de les emissions totals de gasos d'efecte hivernacle a Espanya i gairebé el 40% de les emissions dels sectors difusos. Per modes de transport, la carretera representa gairebé el 95% de les emissions, mentre que la contribució d'altres modes de transport és bastant més minoritària.

### 3.3. Normativa sobre emissions contaminants dels vehicles

En aquest apartat es presenta la normativa relacionada amb les emissions contaminants dels vehicles. Les normes europees que regulen els límits acceptables per les emissions de gasos dels vehicles nous venuts als Estats Membres de la Unió Europea i finalment les normes dins l'Estat Espanyol [8][9]. L'anàlisi de la normativa, tant europea com espanyola, es centrarà més en el transport pesat per carretera que no en el conjunt global de vehicles.

#### 3.3.1. Normativa europea

Les normes d'emissions europees es defineixen en una sèrie de directives de la Unió Europea amb una implantació progressiva que cada cop resulta ser més restrictiva. Actualment, les emissions de òxids de nitrogen, hidrocarburs, monòxid de carboni i partícules estan regulades per la majoria de vehicles; s'exclouen els vaixells de navegació marítima i els avions. Per cada tipus de vehicle s'apliquen normes diferents. Es prohibeix la venda dels vehicles nous no conformes amb la normativa, però les normes noves no són aplicables als vehicles que ja estan en circulació.

##### 3.3.1.1. Reglament (CE) n° 595/2009 sobre la homologació dels vehicles de motor i els motors

El Reglament (CE) n° 595/2009 estableix les normes relatives a la homologació dels vehicles de motor, els motors i les peces de recanvi dels vehicles pesats en relació amb el seu comportament en matèria d'emissions. El Reglament va derogar les Directives 80/1269/CEE, 2005/55/CE i 2005/78/CE amb efecte a partir del 31 de desembre de 2013.

Aquest reglament es compon d'etapes denominades Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV, Euro V i Euro VI i actualment la que es troba vigent és la Euro VI. El Reglament s'aplica als vehicles de motor de les categories M1, M2, N1 i N2, segons es defineixen en l'annex II de la Directiva 2007/46 / CE, amb una massa de referència superior a 2.610 kg, i a tots els vehicles de motor de les categories M3 i N3, tal com es defineixen en l'annex esmentat.

En la Figura 3.3 es poden comprovar els límits d'emissions de la Euro VI.

Límites de emisiones Euro VI								
	Valores límite							
	CO (mg/kWh)	HCT (mg/kWh)	HCNM (mg/kWh)	CH <sub>4</sub> (mg/kWh)	NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup> (mg/kWh)	NH <sub>3</sub> (ppm)	Masa de materia particulada (mg/kWh)	Número de partículas (en la materia particulada) <sup>(2)</sup> (#/kWh)
Ciclo ESC (Eco)	1 500	130			400	10	10	
Ciclo ETC (Eco)	4 000	160			400	10	10	
Ciclo ETC (Ech)	4 000		160	500	400	10	10	
Ciclo WHSC <sup>(3)</sup>								
Ciclo WHTC <sup>(3)</sup>								

Nota:  
 Ech = Encendido por chispa.  
 Eco = Encendido por compresión.  
<sup>(1)</sup> El nivel admisible del componente NO<sub>2</sub> en el valor límite de los NO<sub>x</sub> podrá definirse posteriormente.  
<sup>(2)</sup> Más adelante se establecerá una norma relativa al número de partículas y a más tardar el 1 de abril de 2010.  
<sup>(3)</sup> Los valores límite relativos al ciclo mundial estacionario (WHSC) y al ciclo mundial transitorio (WHTC), que reemplacen a los valores límite relativos a los ESC y los ETC, se introducirán más adelante, una vez se hayan establecido los factores de correlación con los ciclos de pruebas actuales (los ciclos europeos transitorio [ETC] y estacionario [ESC]) y a más tardar el 1 de abril de 2010.

Figura 3.3. Límits d'emissions segons la Euro VI. [8]

### 3.3.2. Espanya

#### 3.3.2.1. Llei 34/2007, de 15 de novembre, de qualitat de l'aire i protecció de la atmosfera

Aquesta Llei actualitza la base legal per als desenvolupaments relacionats amb l'avaluació i la gestió de la qualitat de l'aire a Espanya, i té com a fi últim aconseguir uns nivells òptims de qualitat de l'aire per evitar, prevenir o reduir els riscos o els efectes negatius sobre la salut humana, el medi ambient i altres béns de qualsevol naturalesa. Mitjançant la mateixa s'habilita el Govern a definir i establir els objectius de qualitat de l'aire i els requisits mínims dels sistemes d'avaluació de la qualitat de l'aire, i serveix de marc regulador per a l'elaboració dels plans nacionals, autonòmics i locals per a la millora de la qualitat de l'aire.

#### 3.3.2.2. Reial Decret 102/2011, de 28 de gener, relatiu a la qualitat del aire

Aquesta norma transposa a l'ordenament jurídic espanyol el contingut de la Directiva 2008/50/CE, de 21 de maig de 2008 i la directiva 2004/107/CE, de 15 de desembre de 2004.

S'aprova amb la finalitat d'evitar, prevenir i reduir els efectes nocius de les substàncies mencionades sobre la salut humana, el medi ambient en el seu conjunt i la resta de béns de qualsevol naturalesa.

Aquest Real Decret va ser modificat pel Reial Decret 678/2014 per modificar els objectius de qualitat del sulfur de carboni establerts en la disposició transitòria única, i pel Reial Decret 39/2017, per transposar a l'ordenament jurídic espanyol la Directiva 2015/1480, que estableix normes relatives als mètodes de referència, validació de dades i ubicació dels punts de medició per la avaluació de la qualitat de l'aire ambient, i incorporar els nous requisits d'intercanvi d'informació establerts en la Decisió 2011/850/UE. A més, aquest últim Reial Decret preveu l'aprovació d'un índex nacional de Qualitat de l'Aire que permeti informar a la ciutadania, d'una manera clara i homogènia a tot el país, sobre la qualitat de l'aire que es respira a cada moment.

## 4. Motor de combustió interna (MCI)

La funció principal d'un motor és la de produir energia mecànica a partir d'energia química procedent d'un combustible. Segons on es produeixi la combustió, els motors poden ser de combustió externa (MCE) o de combustió interna (MCI). En els primers, la combustió es desenvolupa fora del motor, com és el cas de la màquina de vapor. En els segons l'energia s'extreu cremant o oxidant el combustible dins el motor. La mescla d'aire-combustible abans de la combustió i els productes resultants després de la combustió són el que s'anomenen fluids de treball. Utilitzen com a combustible un hidrocarbur, com la gasolina, el querosè o el dièsel, tot i que també es pot utilitzar el gas líquid del petroli o el gas natural.

Existeixen diferents tipus de motor de combustió interna. Els principals són el motor d'explosió cicle *Otto*, el motor dièsel, el motor *Wankel*, la turbina de gas i el motor rotatiu. La diferència que existeix entre ells, i que per tant els classifica, és que tenen diferents sistema d'engegada. En el cas del motor Otto el sistema d'ignició consisteix en una bugia que fixada en cada cilindre que disposa de dos elèctrodes separats per uns mil·límetres entre els quals el impuls elèctric produeix una espurna que inflama el combustible. En el cas dels motors Diesel, el combustible s'inflama per compressió.

### 4.1. Parts d'un MCI

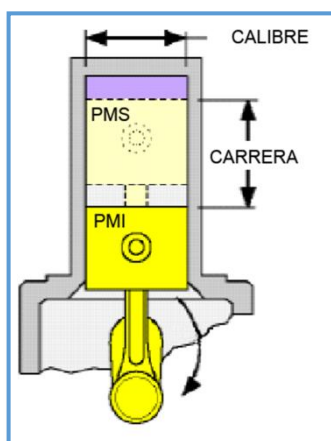
Els motors alternatius tenen com elements principals:

- Bloc del motor. És el cos del motor que conté els cilindres, aquest acostumen a ser d'alumini o de fosa. El bloc dels motors refrigerats per aigua contenen els orificis pel pas de l'aigua o en el cas dels motors refrigerats per aire les aletes que serveixen per a refrigerar el motor.
- Arbre de lleves. Eix rotatori que serveix per empènyer i obrir les vàlvules en el temps adequat pel cicle, sigui de forma directa o utilitzant una unió hidràulica o mecànica. Els motors moderns porten un o més arbres de lleves muntats al bloc del motor. Els arbres de lleves estan fets d'acer forjat o fosa i estan conduïts pel cigonyal a través d'una corretja o una cadena. En els motors de quatre temps l'arbre de lleves gira a la meitat de la velocitat amb la qual gira el motor.



Figura 4.1. Arbre de lleves.

- **Camra de combustió.** Espai entre la culata i el cap del pistó on la combustió té lloc. La mida de la cambra de combustió canvia contínuament des del mínim volum PMS (punt mort superior) i el màxim volum PMI (punt mort inferior). Els motors poden tenir cambres de combustió obertes si només tenen una cambra per cilindre o cambres dividides si tenen dues cambres comunicades per un orifici per cilindre.



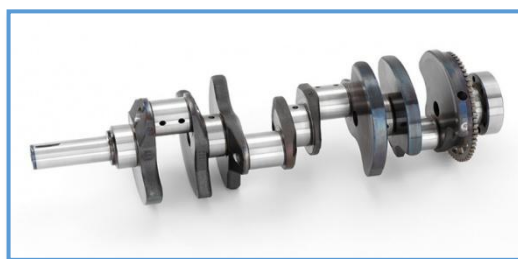
**Figura 4.2.** Cambra de combustió.

- **Biela.** Aquesta connecta el pistó amb el cigonyal. En la majoria de motors està formada per acer o un aliatge forjat però en alguns també es pot trobar d'alumini.



**Figura 4.3.** Biela.

- **Carter.** Part del bloc motor encarregat de recollir l'oli lubricant del motor i d'acollir el cigonyal.
- **Cigonyal.** Eix rotatori mitjançant el qual es realitza l'entrega de potència del motor. Està unit al bloc motor mitjançant uns rodaments. Rota gràcies al moviment recíproc dels pistons que li transfereixen el moviment mitjançant la biela. Els cigonyals estan formats d'acer forjat o de fosa.



**Figura 4.4.** Cigonyal.



- Cilindres. Cilindres circulars per on es mouen recíprocament els pistons. Les parets dels cilindres són superfícies molt polides per evitar la fricció amb els pistons. Els cilindres poden estar o no refrigerats directament.



**Figura 4.5.** Camisa o Cilindre.

- Sistema d'escapament. Sistema encarregat d'extraure els gasos d'escapament. Està format pels col·lectors d'escapament, catalitzador i silenciadors. Aquests últims són els encarregats de reduir el soroll del motor.
- Ventilador. La majoria de motors tenen un ventilador encarregat d'incrementar el flux d'aire a través del radiador i del motor, permeten una millor alliberació de calor i refrigeració. Poden estar accionats mecànicament o elèctricament, hi poden funcionar de manera contínua o només quan és necessari.
- Volant d'inèrcia. Element encarregat d'emmagatzemar energia i proporcionar un gran moment angular suavitzant el funcionament del motor.



**Figura 4.6.** Volant d'inèrcia del motor.

- Culata. Element que tanca el final dels cilindres. Va unida al bloc motor per la part superior i forma part de la cambra de combustió. Està fabricat de forja o alumini. Conté la bugia, en el cas dels motors Otto, o el injectors, pels motors dièsel.

- Col·lectors d'admissió. Conductes encarregats d'alliberar l'aire als cilindres.



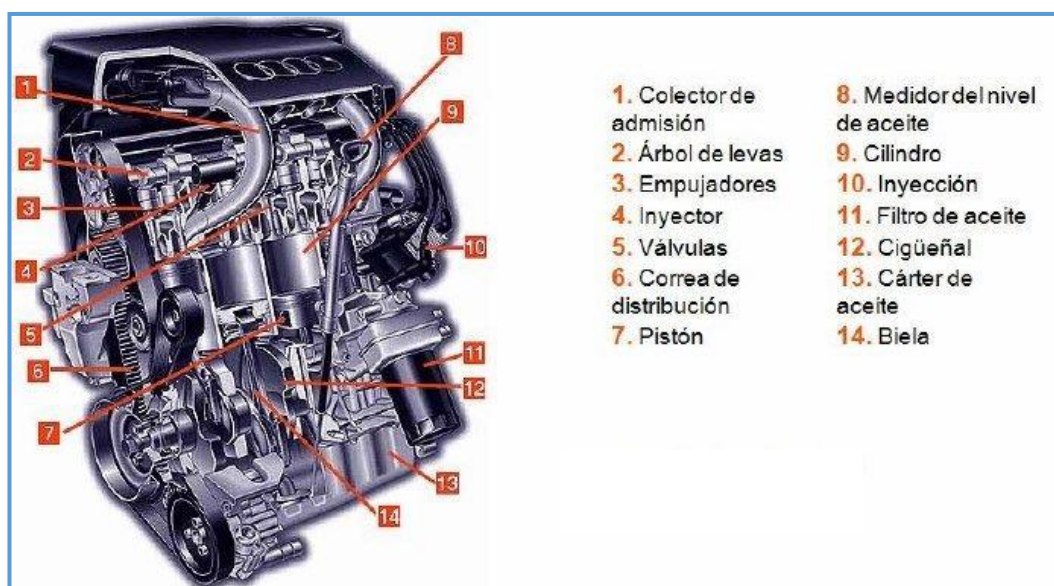
**Figura 4.7.** Col·lectors d'admissió.

- Pistó. Element cilíndric que es mou recíprocament dins del cilindre i que transfereix la pressió dels gasos de la combustió al cigonyal. La cara superior del pistó forma part de la cambra de combustió i pot ser plana o amb contorns especials.



**Figura 4.8.** Pistó.

En la Figura 4.9 es pot veure un dibuix complet del motor i on s'ubiquen les parts descrites anteriorment:



**Figura 4.9.** Motor dièsel complet amb les seves parts.

## 4.2. Funcionament d'un MCI

La càmera de combustió és un cilindre, generalment fix, tancat per un extrem i dins el qual llisca un pistó molt ajustat al cilindre. La posició cap a dins i fora del pistó modifica el volum que existeix entre la cara interior del pistó i les parets de la càmera. La cara exterior del pistó està unida per una biela al cigonyal, que converteix en moviment rotatori el moviment lineal del pistó. En els motors de varis cilindres, el cigonyal té una posició de partida, anomenada espiga del cigonyal i connectada a cada eix, amb el que la energia produïda per cada cilindre s'aplica al cigonyal en un punt determinat de la rotació. Els cigonyals compten amb volants i contrapesos pesats la inèrcia dels quals redueix la irregularitat del moviment de l'eix. Un motor alternatiu pot tenir de 1 a 28 cilindres. Les distribucions més comunes són 4, 6, 8, 10 i 12 cilindres.

El sistema d'alimentació de combustible consta d'un dipòsit, una bomba de combustible i un dispositiu dosificador de combustible que vaporitza o atomitza el combustible des de l'estat líquid en les proporcions correctes per poder ser cremat. En els motors de varis cilindres el combustible vaporitzat és portat cap als cilindres a través d'un tub ramificat que s'anomena col·lector d'admissió. La major part dels motors compten amb un col·lector d'escapament o d'expulsió que transporta fora del vehicle i redueix el soroll dels gasos produïts en la combustió.

Cada cilindre pren el combustible i expulsa els gasos a través de vàlvules lliscants. Una molla manté tancades les vàlvules fins que s'obrin en el moment adequat, al actuar les lleves d'un arbre de lleves rotatori mogut pel cigonyal, estant el conjunt coordinat mitjançant la cadena o la corretja de distribució.

Atès que la combustió produeix calor, tots els motors han de disposar d'algun tipus de sistema de refrigeració. Alguns motors estacionaris d'automòbils i d'avions es refrigeren amb aire. En altres motors s'utilitza refrigeració per aigua, el que implica que els cilindres es troben dins d'una carcassa plena d'aigua que en els automòbils es fa circular mitjançant una bomba. L'aigua es refrigera en passar per les làmines d'un radiador. És important que el líquid que s'usa per refredar el motor no sigui aigua comuna, sinó un refrigerant, perquè els motors de combustió treballen regularment a temperatures més altes que la temperatura d'ebullició de l'aigua.

## 4.3. Cicle Otto

El motor *Otto* segueix el cicle termodinàmic *Otto*, que es caracteritza per la ignició per espurna, és a dir el combustible crema gràcies a una espurna o guspira elèctrica. És el motor convencional de benzina. Treballa a pressions moderades i a elevades revolucions, de manera que s'arriba a la màxima potència en revolucions entre 5.500 i 7.000 rpm. La relació de compressió d'un motor Otto es troba entre 8:1 i 11:1. El rendiment d'aquest motor acostuma a ser entre un 20% i un 25%.

El cicle Otto ideal té en compte quatre processos. En primer lloc es produeix la compressió adiabàtica, és a dir, la compressió de la barreja de l'aire i el combustible sense pèrdues de calor. A continuació, es produeix l'adició de calor a volum constant mitjançant l'encesa de la bugia que genera la combustió permetent l'expansió adiabàtica. Finalment, es produeix el rebuig de calor a volum constant i s'obren les vàlvules d'escapament perquè surtin els gasos d'escapament. En el mateix temps, s'introdueix una nova quantitat d'aire i combustible sense cremar per tal de començar novament el cicle. El cicle que segueix és el que es mostra en els diagrames pressió – volum específic i temperatura – entropia específica de la Figura 4.10.

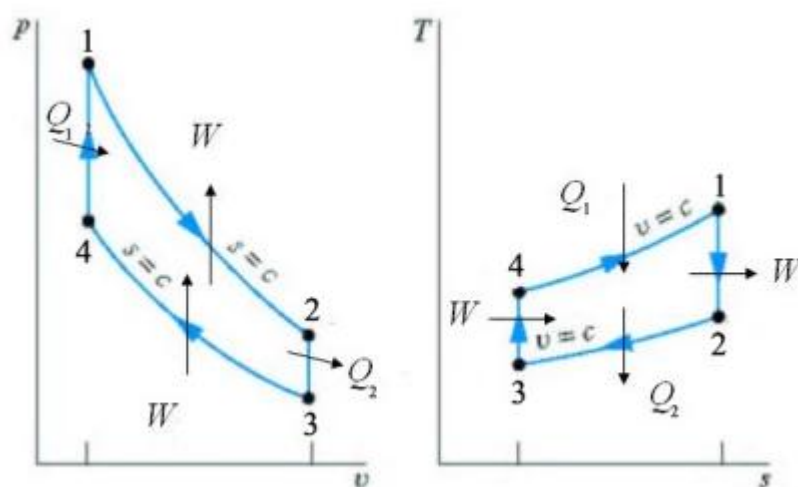


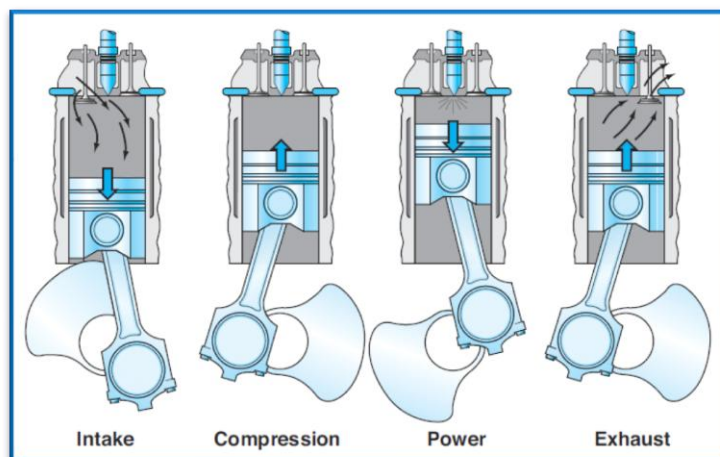
Figura 4.10. Cicle Otto teòric en motor combustió interna. [20]

#### 4.4. Cicle dièsel

Un cicle complet d'un motor dièsel, d'igual manera que el motor *Otto*, requereix dues rotacions completes. Cada rotació requereix girar el motor a 360 graus, de manera que un cicle dièsel complet es tradueix en 720 graus de cigonyal. Cada un dels quatre processos que componen el cicle del dièsel implica moure un pistó des de la part superior del seu recorregut fins al punt més baix del recorregut o viceversa; cada cop del cicle es tradueix en 180 graus de cigonyal. Els quatre cops que componen el cicle de quatre temps són:

- Admissió ("Intake")
- Compressió ("Compression")
- Treball ("Power")
- Escapament ("Exhaust")

Aquests quatre processos del cicle del dièsel es mostren a la Figura 4.11.



**Figura 4.11.** Etapes del cicle dièsel. [6]

En l'admissió el pistó surt cap a fora i s'absorbeix aire cap a la càmera de combustió. En la fase compressió, que el pistó s'endinsa, l'aire es comprimeix la qual cosa provoca que la temperatura augmenti fins uns 800°C. Al final d'aquesta fase de compressió s'injecta el combustible a gran pressió mitjançant els injectors i s'atomitza dins de la càmera de combustió produint-se així la inflamació a causa de l'alta temperatura de l'aire. En la tercera fase, la fase de treball, la combustió empeny el pistó cap a fora transmetent la força longitudinal al cigonyal a través de la biela, transformant-se en una força de gir parell de motor. La quarta i última fase es la d'escapament, quan el pistó torna cap endins i els productes resultants de la combustió són expulsats.

L'eficiència o rendiment dels motors dièsel depenen de les pressions (i per tant de les temperatures) inicial i final de la fase de compressió. És més gran que en els motors de gasolina, arribant a superar el 40%. Aquest valor s'aconsegueix amb un grau de compressió de 20 a 1 aproximadament.

El cicle que segueix és el que es mostra en els diagrames pressió – volum específic i temperatura – entropia específica de la Figura 4.12.

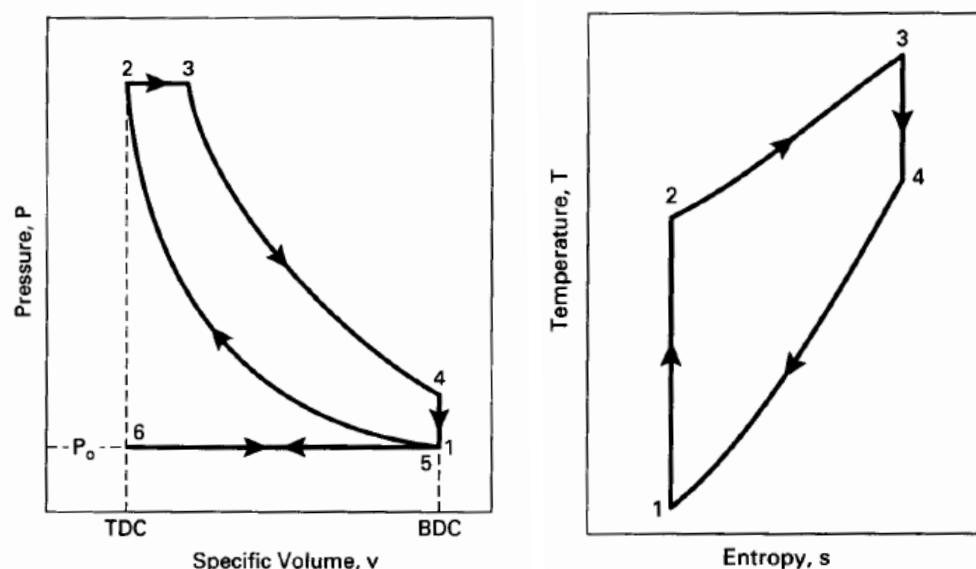


Figura 4.12. Cicle dièsel teòric en motor combustió interna. [10]

Aquests cicles són una aproximació basada en l'ús d'aire ideal en el cilindre i la transferència de calor entre el sistema i l'exterior. La primera fas (1-2) consta d'una compressió del fluid en el cilindre adiabàtica i isentròpica. La segona fase (2-3) es sustenta en una aportació de calor des del exterior a pressió constant, simbolitzant la combustió. La tercera fase (3-4) radica en l'expansió d'aire adiabàticament i isentròpicament. La quarta fase (4-1) realitza la transferència de calor ca al medi de forma isocora, assimilant-se a l'escapament dels gasos. L'últim procés (5-6) és la carrera d'escapament que es produeix a una pressió constant d'una atmosfera a causa de la vàlvula d'escapament oberta. Es tracta d'una bona aproximació a la carrera d'escapament real, que es produeix a una pressió lleugerament superior a la pressió circumdant a causa de la petita caiguda de pressió a través de la vàlvula d'escapament i al sistema d'escapament.

El combustible dièsel (assimilat al compost dodecà,  $C_{12}H_{26}$ ) és un derivat del petroli obtingut per destil·lació fraccionada entre els 200 °C i 350 °C a pressió atmosfèrica. Es compon d'un 75% d'hidrocarburs saturats (majoritàriament parafines tipus n, iso, i cicloparafines) i d'un 25% d'hidrocarburs aromàtics (incloent les naftalines i benzens alcalins). Les propietats del combustible dièsel són les mostrades en la Taula 4.1.

Densitat	840 kg/m <sup>3</sup>
PCI	42,5 MJ/kg

Punt d'ebullició inicial	180 °C
Punt d'ebullició final	360 °C
Pressió de vapor	<0,1 kPa a 40 °C
Viscositat cinemàtica	7 mm <sup>2</sup> /s a 40 °C
Límits d'explosió	6-6,5 %
Temperatura auto ignició	250 °C

**Taula 4.1.** Propietats del dièsel. [11]

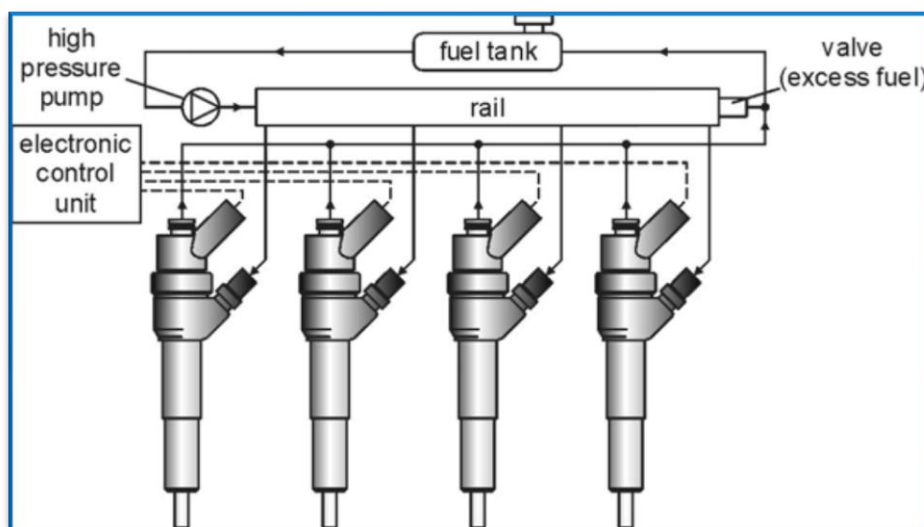
#### 4.4.1. Sistema *Common-Rail*

El sistema de *Common-Rail* o conducte comú és un sistema electrònic d'injecció de combustible per a motors dièsel d'injecció directa en el que el gasoil és aspirat directament del dipòsit de combustible a una bomba d'alta pressió, i aquesta al seu torn l'envia a un conducte comú per a tots els injectors i a alta pressió des de cada un d'ells al seu cilindre.

El combustible emmagatzemat en el dipòsit de combustible a baixa pressió és aspirat per una bomba de transferència accionada elèctricament i enviat a una segona bomba, en aquest cas d'alta pressió, que injecta el combustible a pressions que poden variar des d'uns 300 bar fins entre 2200 i 2500 bar al cilindre, segons les condicions de funcionament.

La bomba de transferència pot anar muntada en la pròpia bomba d'alta pressió, accionada pel mecanisme de distribució i sobretot a l'interior del dipòsit de combustible. El conducte comú és una canonada o "rampa" de la qual parteix una ramificació de canonades per a cada injector de cada cilindre.

En la Figura 4.13 es pot veure un esquema bàsic del sistema CR explicat anteriorment.



**Figura 4.13.** Sistema d'injecció *Common Rail*. [12]

El principal avantatge d'aquest sistema és que permet controlar electrònicament mitjançant una Unitat Electrònica de Control (ECU) la injecció i la pressió del rail, a més de les funcions del motor i el vehicle. Les entrades principals són la temperatura del combustible de la bomba, la pressió del combustible en el rail i els paràmetres del motor (velocitat del motor, temps, posició del pedal del accelerador, pressió del turboalimentador, entre d'altres). Com a sortides principals existeixen la corrent d'accionament per la vàlvula de control del injector, la corrent d'accionament per la vàlvula de derivació del cabal d'entrada i l'escalfador del filtre de combustible.

Existeixen bàsicament tres circuits: el circuit de baixa pressió per la línia de retorn, el circuit d'altra pressió i el circuit d'alimentació.

El circuit de baixa pressió té dues funcions principals; el de rebre el flux de la línia de retorn de la bomba i desviar-la de retorn cap al dipòsit de dièsel, i el de rebre el flux de la línia de retorn del injector on aquesta última funció és ajudada per un tub Venturi per crear un buit en la línia de retorn).

El circuit d'alta pressió funciona amb una bomba d'alta pressió (HP) per comprimir el combustible des del circuit de baixa pressió fins el rail a través d'una canonada d'alta pressió. Un rail per acumular combustible altament pressuritzat, connectat a la vegada als injectors per canonades d'alta pressió. Els injectors són controlats electrònicament (un per cilindre), els quals asseguren la introducció de la quantitat requerida de combustible en el moment precís en els cilindres.

El circuit d'alimentació és un circuit de baixa pressió que alimenta a l'equip de combustible amb combustible filtrat i pressuritzat.



## 5. Sistema Dual-Fuel

### 5.1. Antecedents

Gran part del desenvolupament inicial del motor de combustió interna es va basar en l'ús de combustibles gasosos. L'ús generalitzat en aquell moment del gas carbó, usat per a la il·luminació, aplicacions domèstiques i industrials, també va impulsar el seu ús en motors, tot i que el gas era altament tòxic i explosiu. També hi havia algunes aplicacions de motors que utilitzaven gasos combustibles derivats industrialment, com ara els de la indústria siderúrgica o el processament de les aigües residuals i biomassa municipals. Després del ràpid èxit del motor de combustió interna de quatre temps, el motor de combustió de gas tendia a limitar-se principalment a les aplicacions especials i als camps de motor estacionaris. Va ser l'any 1901 quan *Rudolf Diesel* va obtenir una patent nord-americana que abasta el concepte de motor de doble combustible. Uns altres van seguir després amb patents que descriuen el funcionament dels motors de combustió interna de ràtio d'alta compressió que funcionen tant amb petroli com en gasos.

Algunes aplicacions dels motors de gas es van poder veure abans de la Segona Guerra Mundial en països com Itàlia, Rússia, Alemanya, Holanda, Estats Units i el Regne Unit. Alguns motors de doble combustible van ser sobrealimentats i uns altres operaven amb gas natural d'alta pressió. No obstant això, aquests enfocaments no van veure aplicacions àmplies en la indústria energètica fins molt més tard.

Les aplicacions de transport de gas natural van disminuir considerablement després de la guerra, principalment a causa de la creixent disponibilitat en el moment del subministrament de petroli relativament barat. No obstant això, els motors de doble combustible es van utilitzar àmpliament per a aplicacions estacionàries especials, principalment per a la generació de potència, com per exemple la indústria petroliera o en les aigües residuals municipals que van ajudar, a través de la cogeneració, a la producció de gas natural, també utilitzat com el combustible per al motor. Només ha estat en les últimes dècades, impulsat pels controls cada vegada més estrictes de la contaminació de l'aire i l'augment del cost dels combustibles en general, que han començat a augmentar les aplicacions de motors a gas, principalment en la generació d'energia elèctrica estacionària i en els sectors de vehicles comercials. A més, la disponibilitat cada vegada més àmplia de subministraments a granel de gas natural a través del transport de gasoductes de llarga distància i subministrament de gas natural líquid (GNL) transportat per via marítima des de zones remotes del món va fer que el funcionament dels motors amb el gas natural sigui cada vegada més possible i econòmicament atractiu. L'augment de la disponibilitat de subministraments de GNL també va encoratjar el desenvolupament de motors que poden operar directament sobre GNL. Actualment, hi ha molts sistemes comercials de doble combustible disponibles per diversos fabricants en moltes parts del món. Tanmateix, encara que aquests sistemes funcionin adequadament, no necessàriament tenen el seu funcionament prou optimitzat, especialment per a l'aplicació específica. Amb l'augment de les incerteses recents sobre la fiabilitat dels

subministraments d'energia elèctrica, juntament amb l'augment de la disponibilitat de subministraments barats i relativament abundants de gas natural, l'augment del preu del combustible dièsel i les possibles limitacions als seus subministraments i amb els controls cada vegada més estrictes sobre les emissions, s'espera que el motor de doble combustible experimenti guanys significatius en popularitat. Mentrestant, el motor dièsel normal segueix guanyant en eficiència, densitat de potència i fiabilitat.

## 5.2. Avantatges i inconvenients respecte un motor dièsel

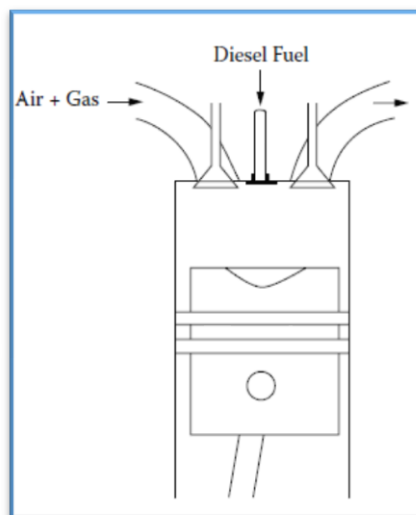
La transformació d'un vehicle de dièsel a gas suposa, com tot, unes avantatges i uns inconvenients. Per una banda els vehicles a gas dupliquen la duració del moto degut al menor desgast de cilindres i segments. És més net, deixa menys dipòsits carbonosos en la combustió i permet que l'oli del motor es mantingui net durant més temps. El gas suposa un cost menor que el dièsel i és molt menys contaminant. Amb aquest, a Espanya, es pot disposar de l'etiqueta Eco que permet tenir certs avantatges en algunes localitats o carreteres al ser considerats vehicles ecològics. Com manté el sistema d'alimentació de gasoil, el vehicle pot funcionar amb ambdós combustibles i en un moment donat pot anar només en mode dièsel per si existeix algun problema en trobar un lloc de repostatge de gas.

El principal problema d'operació del motor en mode dual de combustible és que a baixa càrrega la eficiència del sistema disminueix, és a dir, la quantitat de dièsel que es pot reemplaçar per gas es baixa en comparació amb altres punts amb major càrrega en l'equip, la qual cosa significa que el sistema és més eficient a mesura que augmenta la potència exigida al motor. Les emissions d'hidrocarburs no cremats i monòxid de carboni quan l'equip opera a baixa càrrega poder arribar a ser més alts en comparació amb el funcionament sols amb dièsel. A més, la disponibilitat del combustible gas és molt menor a la del dièsel. Les estacions de servei a Espanya de gas natural suposen un 5% del total de les convencionals i les de GLP un 0,4%. A tot això s'ha d'afegir que el poder energètic del gas és menor al del gasoil que també suposa una disminució del rendiment.

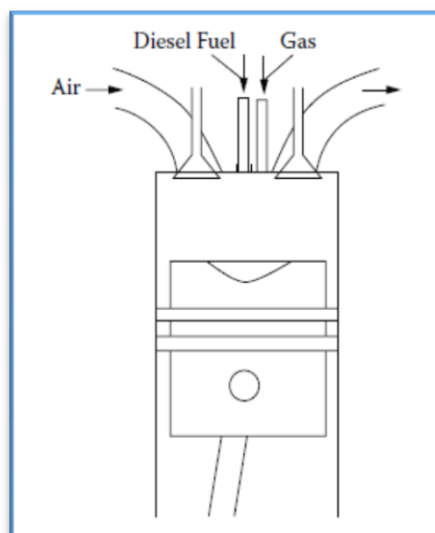
## 5.3. Funcionament actual del sistema Dual – Fuel

El motor amb sistema dual-fuel és bàsicament un motor convencional d'encesa per compressió del tipus dièsel on s'utilitza la injecció d'alguns combustibles líquids, sovint en dosis bastant petites, per proporcionar la font d'ignició, el que s'anomena dièsel pilot i fa la mateixa funció que la bugia en un motor *Otto*. La càrrega del cilindre es compon principalment de mescles d'un combustible i aire gasosos (Figura 5.1). Hi ha una sèrie de variacions d'aquest mode de funcionament, com ara que el combustible gasós sigui injectat a pressions d'alimentació molt elevades directament al cilindre del

motor de manera que el combustible es crema a l'hora de la injecció (Figura 5.2). Normalment, en aplicacions de motors de dual-fuel, principalment per motius econòmics, gran part de l'alliberament d'energia prové de la combustió del combustible gasós normalment més barat, mentre que només una petita quantitat de combustible líquid dièsel s'injecta per proporcionar ignició mitjançant una injecció de cilindre temporal en l'habitual manera que succeeix en motors dièsel convencionals. Aquesta operació, amb mètodes de conversió òptims, ha demostrat tenir el potencial de proporcionar característiques operatives que sovint són comparables o fins i tot superiors a les dels motors convencionals de gasoil o combustible que funcionen amb gasoil.



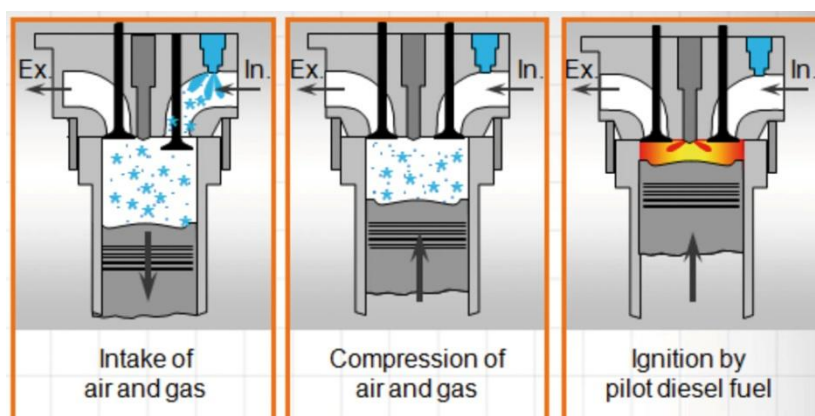
**Figura 5.1.** Representació esquemàtica d'un motor dual amb injecció dièsel com a pilot per la ignició. [13]



**Figura 5.2.** Representació esquemàtica d'un motor dual on el gas és injectat directament dins de la cambra i la ignició és a partir del dièsel pilot. [13]

El mode de funcionament és el següent. Inicialment, s'obri la vàlvula d'admissió i s'inicia la fase d'admissió d'aire en el cilindre. Durant l'admissió, s'obre la vàlvula del gas natural pel qual

s'introdueix el mesclat amb l'aire en el cilindre. Després d'arribar al PMI, es tanca la vàlvula d'admissió i comença la compressió de la mescla aire – gas natural. Quan el pistó es troba prop del PMS, s'injecta el dièsel dins del cilindre. El gas encara no s'ha auto inflammat, gràcies al seu elevat octanatge. Seguidament el dièsel s'autoinflama, la qual cosa produeix un augment de pressió i temperatura en la cambra de combustió. Això fa que s'iniciï la combustió del gas encara que el mode de combustió no respon exactament a una flama sinó que s'obtenen taxes de combustió majors. Això es realitza durant el cicle d'expansió, transmetent treball al cigonyal. Finalment, al arribar al PMI, s'obre la vàlvula d'escapament i s'evacuen els gasos cremats en la cambra de combustió, tornant així a repetir el cicle. Aquest cicle es troba representat en la Figura 5.3.



**Figura 5.3.** Cicle motor dual-fuel, seguint el mode d'operació de mescla d'aire amb gas. [14]

## 5.4. Gas Liquat Petroli (GLP)

El gas liquat del petroli o GLP és un gas dissolt al petroli que s'obté evaporant el petroli cru i condensant aquests gasos. En aquest projecte s'estudiarà el GLP comercialitzat a Espanya per la companyia *Repsol* que està compost principalment per hidrocarburs C3 (propà) i C4 (butà) en un 32,53% i 66,98% de composició massica respectivament. La resta són hidrocarburs C2 (età) (0,29%) i C5 (pentà) (0,18%), olefines (1,40%), diolefines i acetilens (<100 ppm (v/v)), sofre (4,99 mg/kg) i residu dissolt en GLP (<10 mg/kg).

El GLP es produeix en estat de vapor, però es liqua amb certa facilitat, mitjançant compressió i refredament, no té color, és transparent com l'aigua en el seu estat líquid, és inodor quan es produeix i liqua, però se li agrega una substància d'olor penetrant, metanotiol, per a detectar-lo quan té una fuga, no és tòxic, només desplaça l'oxigen, pel que no és pot respirar molt de temps. És molt inflamable, quan s'escapa i es vaporitza s'encén violentament amb una petita flama o espurna, és excessivament fred, pel fet de poder passar ràpidament de l'estat líquid a vapor, per tant, amb contacte amb la pell produirà sempre cremades de la mateixa manera que ho fa el foc. És net, quan es crema degudament combinat amb l'aire, no forma sutge, ni deixa mal gust en els aliments preparats amb ell. A més a més, és econòmic pel seu rendiment en comparació amb

altres combustibles i per últim, és més pesat que l'aire i s'acumula a les parts més baixes en cas de fuites.

El poder calorífic del GLP depèn de la proporció en que es troben els gasos que el componen, és per això que és necessari quantificar com hi afecta.

La composició del GLP s'expressa en fracció molar ( $x$ ), ara bé, per realitzar els càlculs resulta més apropiat expressar-ho en fraccions massiques ( $y$ ). L'expressió 5.1 permet obtenir el pes molar [kg/kmol] de la mescla.

$$M_{GLP} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot M_i \quad (\text{Eq. 5.1})$$

On  $n$  és el nombre de components de la mescla,  $x_i$  la fracció molar de cada component  $n$  i  $M_i$  el pes molar de cada component  $n$  en kg/kmol.

Una vegada conegut el pes molar és possible obtenir les fraccions massiques ( $y$ ) amb l'equació 5.2.

$$y_i = x_i \cdot \frac{M_i}{M_{GLP}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Coneixent el poder calorífic de cada component (PCI), donat en MJ/kg, és possible el càlcul del poder calorífic de la mescla per unitat de massa (Equació 5.3):

$$PC_{GLP} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot PC_i \quad (\text{Eq. 5.3})$$

En la Taula 5.1 es mostren els valors extrets amb els càlculs anteriors. Per la realització d'aquests s'ha agafat la dada del poder calorífic inferior.

	Fracció molar ( $x$ )	Pes molar ( $M$ ) [kg/kmol]	Fracció massica ( $y$ )	Poder calorífic (PCI) [MJ/kg]
<b>Propà</b>	0,3253	44,1	0,2682	46,20
<b>Butà</b>	0,6698	58,12	0,7278	44,78
<b>Età</b>	0,0029	30,07	0,0016	47,51

<b>Pentà</b>	0,0018	72,15	0,0024	50,2
<b>Mescla GLP</b>	1	53,49	1	45,18

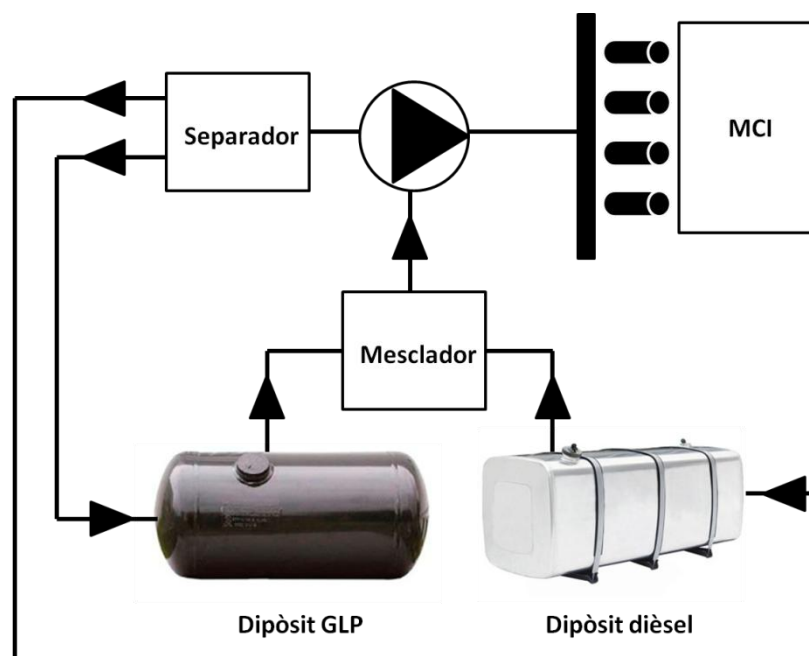
Taula 5.1. Composició del GLP.

## 6. Sistema de disseny

El sistema a dissenyar és també un sistema dual – fuel, que combina Gas Liquefiet del Petrol (GLP) amb dièsel, però a diferència dels sistemes convencionals aquest té el propòsit d’inserir els dos combustibles, ja mesclats prèviament, a la cambra de combustió.

El sistema està compost per un dipòsit amb el combustible dièsel i un altre amb el GLP en fase líquida. El dièsel es troba a pressió atmosfèrica i temperatura ambient i el GLP a 10 bars de pressió relativa i a temperatura ambient. De cada dipòsit surten ambdós combustibles cap a un mesclador, on amb la pressió, temperatura i composició òptimes, entren a la bomba d’alta pressió (HP) i posteriorment al *Common-Rail*. Finalment, el que no s’utilitza a la bomba HP és retornat cap als dipòsits corresponents, havent així de separar els combustibles.

En la Figura 6.1 es pot veure un esquema general del sistema a dissenyar.



**Figura 6.1.** Esquema del sistema de combustible GLP + dièsel.

Pel disseny del sistema s’agafa un motor tipus a fi de poder realitzar els càlculs amb més exactitud. El motor seleccionat és el Cursor 10 450 CV de IVECO, que compleix amb la normativa Euro V. En la Taula 6.1 es detallen les propietats més importants del motor.

Cilindres	6
Capacitat	10.3 L
Potència	331 kW/450 CV
Rpm	1550-2100
Carrera	140 mm
Cilindre	125 mm

Taula 6.1. Propietats motor Iveco Cursor 10 . [15]

El cabal requerit pel motor canvia depenent del consum específic i la potència necessària. En la Figura 6.2 i en la Figura 6.3 es troben representades les característiques d'aquests paràmetres en les diferents condicions que es poden donar.

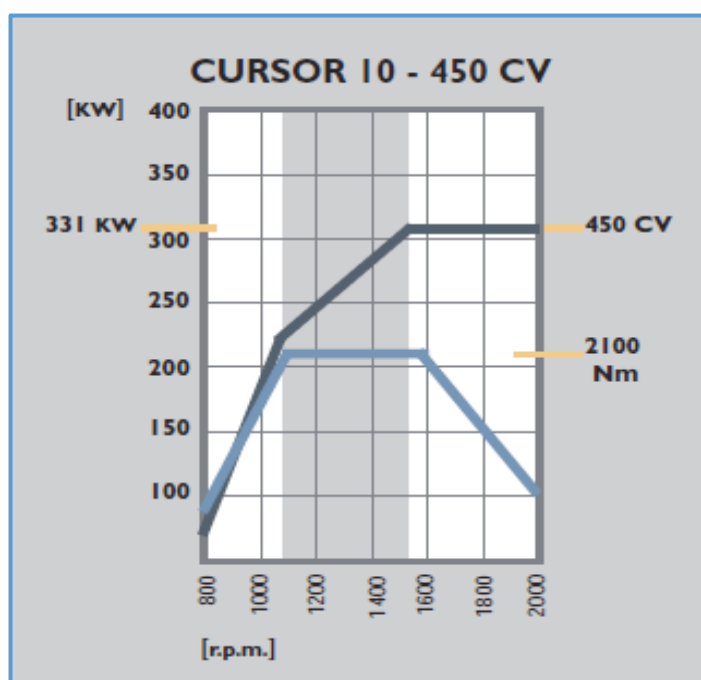


Figura 6.2. Característica de la potència, moment i velocitat de gir del motor. [15]



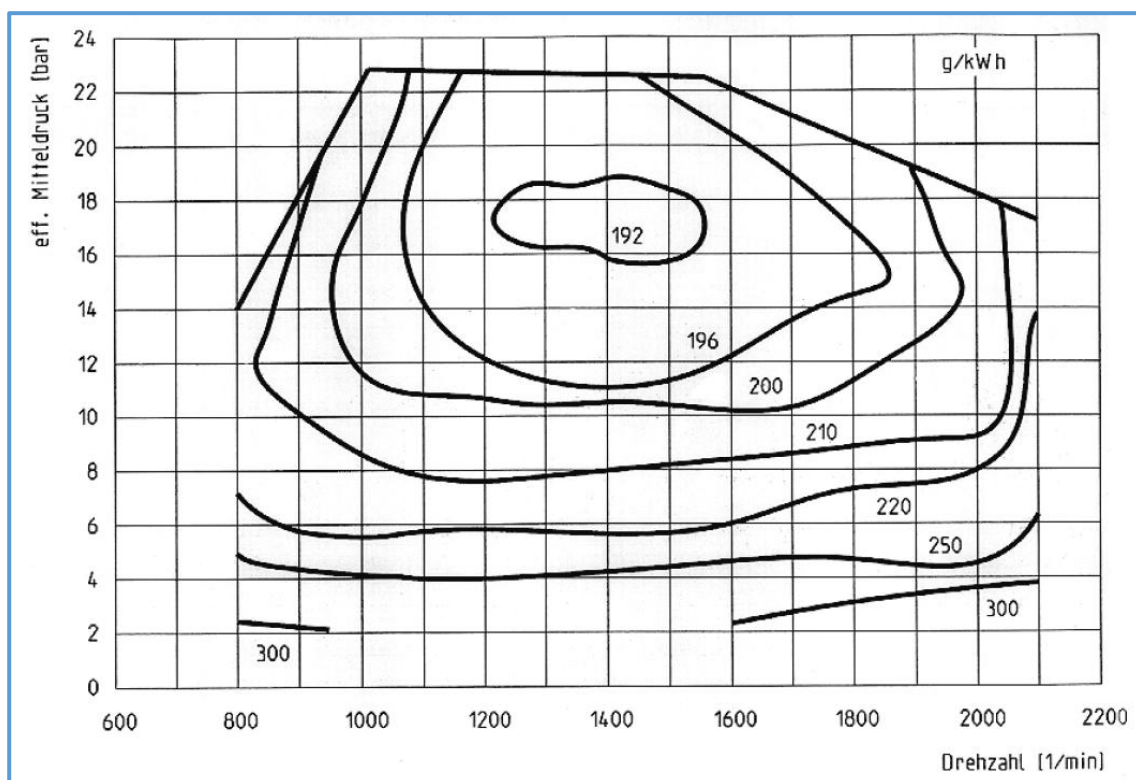


Figura 6.3. Corbes característiques de consum específic del motor. [15]

Així doncs el cabal requerit en cada moment podrà ser calculat com el producte del consum específic i la potència necessària en cada instant. Els valors per un consum específic de 210 g/kWh es veuen representats en la Taula 6.2 i per la realització dels càlculs del projecte s'agafarà el valor de cabal més crític, el màxim.

Potència [kW]	[rpm]	Cabal [kg/s]
50	800	0,00292
200	1000	0,01167
250	1200	0,01458
290	1400	0,01691
331	1600-2000	0,01931

Taula 6.2. Cabals motor en funció de les necessitats instantànies .

## 6.1. Mescla dels combustibles

El GLP es troba dins el seu dipòsit a una pressió de 10 bars relativa i el dièsel a pressió atmosfèrica. Per realitzar la mescla d'ambdós combustibles serà necessari que es trobin en la mateixa fase i a la mateixa pressió. El GLP, amb la composició estudiada en aquest projecte i com es pot observar en el diagrama Ph (pressió absoluta-entalpia específica) de la figura A1 de l'Annex A té la propietat que a temperatura ambient (20°C) es liqua a una pressió de 4 bars i suposant un dels pitjors casos atmosfèrics en hivern a Espanya (0°C) aquest es liqua aproximadament a 2 bar.

D'aquesta manera es planteja la hipòtesi de realitzar la mescla a una pressió de 10 bars, mateixa pressió que el GLP en el seu dipòsit, ja que així ambdós combustibles es troben en fase líquida. S'instal·la una bomba submergible en cada dipòsit per assegurar la pressió de sortida, i per tant de mescla, a 10 bars.

La mescla a aquesta pressió serà estable. El dièsel té el risc de que al comprimir-se agafa una temperatura molt elevada s'autoignicia, el que és el mateix: explota. Així com mostra el diagrama pT de la figura A2 de l'Annex A, l'entropia específica del dièsel a 293 K i pressió 0,1 MPa és de -1,3 kJ/(kg K). Considerant que és un procés de compressió isentròpica i resseguint la línia termodinàmica isentròpica des de 0,1 MPa fins a 1 MPa, s'obté un valor de temperatura gairebé constant, pot diferir d'1 o 2 graus Kelvin positius. D'aquesta manera no suposa cap problema el fet de que el dièsel pugui incrementar de temperatura i com a conseqüència explotar. A part d'això, tampoc suposa cap risc en el fet de que durant el procés de mesclat, si el dièsel augmentés molt la seva temperatura el GLP també augmentaria de temperatura i podria esdevenir un canvi de fase.

Ara bé, el dièsel a una pressió de 10 bars i temperatura ambient té una densitat de 750,15 kg/m<sup>3</sup> i el GLP (composició estudiada en aquest projecte) de 558,55 kg/m<sup>3</sup>. Per aquesta diferència de densitats la mescla no podrà ser homogènia així que serà necessari un element de mescla, que es descriurà en els pròxims apartats.

### 6.1.1. Percentatge de substitució del combustible (GER)

En un motor dual, la relació entre les quantitats de cada tipus de combustible injectades per la seva composició és variable. Un motor d'aquest tipus pot funcionar des d'una proporció en la que tot el combustible sigui dièsel i no hi hagi gas, tal com ho faria un motor dièsel convencional, fins una relació amb gran quantitat de gas i únicament el dièsel necessari per inflamar la mescla que és el que s'anomena dièsel pilot. En el sistema resulta necessari establir una relació entre aquestes quantitats, per això s'introdueix el concepte de percentatge de substitució del combustible original (GER), que fa referència a la quantitat de dièsel que és substituït per GLP.

$$GER = \frac{\dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP}}{\dot{m}_{GLP} \cdot PCI_{GLP} + \dot{m}_{dièsel} \cdot PCI_{dièsel}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Eq. 6.1})$$

On  $\dot{m}_{GLP}$  resulta ser el cabal màssic de combustible GLP utilitzat en kg/s i  $\dot{m}_{dièsel}$  el corresponent al combustible dièsel, també en kg/s.  $PCI_{GLP}$  és el poder calorífic inferior del GLP calculat en la Taula 5.1 de 45,18 MJ/kg, i  $PCI_{dièsel}$  és el del dièsel de 44,80 MJ/kg. El cabal màssic requerit dependrà de la potència requerida en cada moment pel motor i del seu consum específic.

La Taula 6.3 mostra totes les possibles situacions que es podrien plantejar, des d'un percentatge de substitució del 10% al 80% tenint que el cabal requerit pel vehicle a plena potència (331 kW) i a màxima velocitat (2000 rpm) és de 0,0193 kg/s.

GER [%]	Cabal dièsel [kg/s]	Cabal GLP [kg/s]
10	0,017377	0,001931
15	0,016412	0,002896
20	0,015447	0,003862
25	0,014481	0,004827
30	0,013516	0,005792
35	0,012550	0,006758
40	0,011585	0,007723
50	0,009654	0,009654
60	0,007723	0,011585

70	0,0057925	0,013515833
80	0,003861667	0,015446667

Taula 6.3. Hipòtesis realitzades del percentatge de substitució.

### 6.1.2. Mesclador

Per tal de poder aconseguir una mescla òptima i perfectament agitada dels dos combustibles serà necessari fer ús d'un mesclador. Generalment, els líquids es mesclen en un recipient cilíndric que pot estar tancat o obert, ara bé, la mescla pot portar-se a terme dins els tubs que connecten els diferents recipients de processos, i quan aquest sigui el cas els tubs poden servir efectivament com tancs de mescla. Aquest sistema comprendrà d'un mesclador amb doble filtre. Tot combustible ha de ser filtrat ja que és necessari retenir qualsevol partícula o brossa que pugui contenir el combustible i evitar que es puguin obstruir els injectors o la bomba d'injecció. La duració del filtre depèn de la qualitat del combustible i de l'eficiència del filtre previ. Així doncs, s'ha escollit un element que englobi dos filtres, un per cada combustible, i el mesclador.

El sistema a dissenyar constaria de dues entrades i una sortida. Les dues entrades serien les entrades del combustible al seu respectiu filtre. De cada un dels filtres el fluid passaria a un col·lector, que des d'aquest es distribuïria per petits tubs amb orificis: els fluids sortint dels orificis amb direcció radial es mesclarien entre ells i sortirien cap a la única sortida. Per mesclar-se s'aprofitarien del moviment i les propietats del fluid, com la pressió i la velocitat, i no caldria cap element mecànic extern. Aquest sistema ofereix un gran nombre d'avantatges en l'aplicació d'aquest projecte com per exemple que requereix poc espai, no hi ha parts mòbils, el seu període de mesclat és curt, entre d'altres. En la Figura 6.4 es pot veure un esquema principal del sistema explicat.

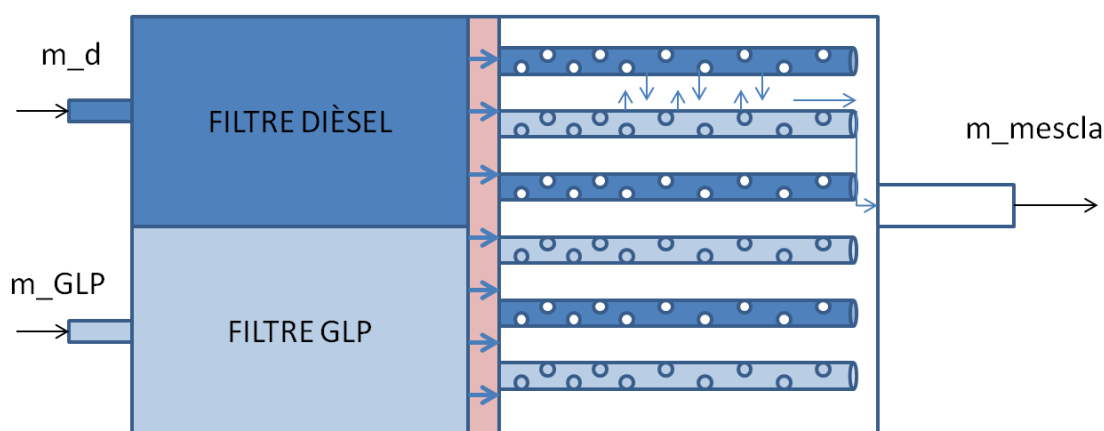
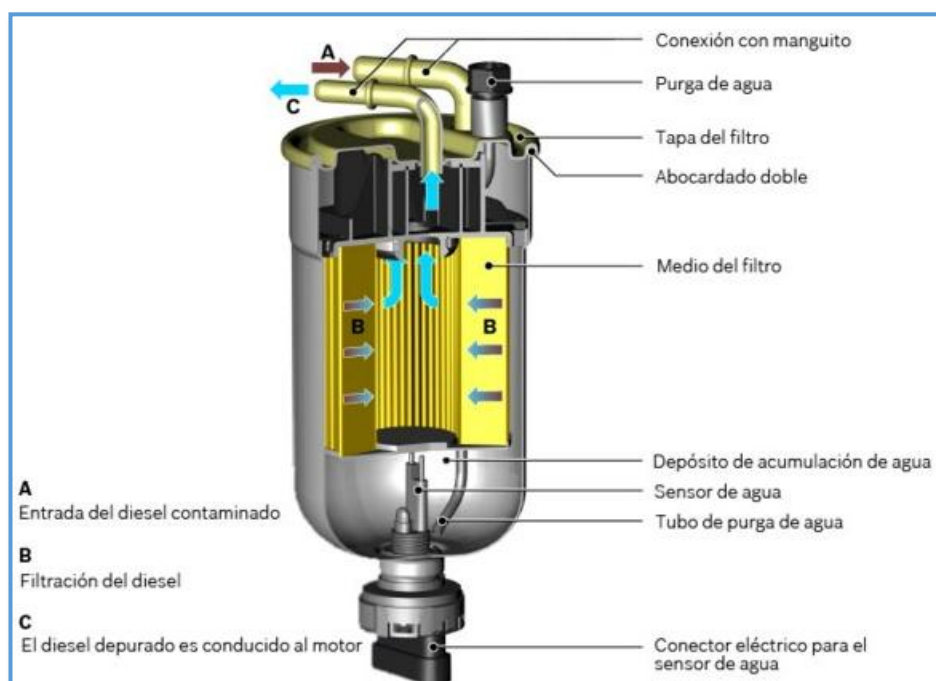


Figura 6.4. Esquema mesclador amb filtre doble.

El filtre a instal·lar serien els mateixos que s'utilitzen actualment en els sistemes dièsel o de GLP. En el cas del dièsel existeixen dos tipus de filtres depenent de la construcció de les fibres de l'element filtrant: els filtres en estrella o els filtres en espiral. El més habitual és el d'estrella ja que és el que permet un major grau de filtratge en el sistema d'injecció. El material més utilitzat són fibres de polièster impregnades amb resines especials. Les fibres de polièster són molt sensibles al contacte amb elements químics del combustible així com el contacte amb l'aigua, per tant, un recobriment de resina ajuda a mantenir les característiques del filtre durant la seva vida útil evitant també el desgast. En la Figura 6.5 es mostren les parts d'un filtre de tipus estrella.



**Figura 6.5.** Esquema filtre dièsel de tipus estrella. [17]

El filtre instal·lat en el motor de referència que es fa servir en aquest projecte és la referència OEM 299 5711. El nombre OEM és un codi que els fabricants automobilístics utilitzen per marcar cada peça de recanvi en l'interior dels vehicles per així demostrar que es compleix els estàndards dels fabricants, així com els paràmetres i especificacions tècniques de l'equip original.



**Figura 6.6.** Filtre dièsel genèric pel motor IVECO Cursor 10 de la marca Bosch. [17]

En el cas del GLP, els filtres són també de la tecnologia tipus estrella encara que normalment són de dimensions més reduïdes que els filtres dièsel.

En aquest apartat s'estudiaran les dimensions que haurien de tenir els filtres, a més de definir les especificacions que han de ser considerades per la correcta elecció del mesclador. Aquests paràmetres depenen exclusivament de l'aplicació específica a les quals es sotmetrà el dispositiu. La implementació d'aquest dispositiu sempre provocarà una caiguda de pressió igual a la d'una canonada que no disposi del mesclador; és per això que el patró de selecció més important és la caiguda de pressió que generarà. Les dues propietats claus en el flux d'una sola fase són la densitat i la viscositat. En un flux turbulent, la caiguda de pressió és directament proporcional a la densitat, pel que la exactitud de la densitat és la exactitud de la caiguda de pressió. Els sistemes de baixa viscositat usualment es troben en flux turbulent, on la viscositat té poc efecte sobre la caiguda de pressió. És important aconseguir tenir un flux laminar per així poder aconseguir un mesclat més pur i tenir un flux més estable.

Per trobar la caiguda de pressió, cal determinar si el flux és laminar o turbulent, per això es calcula el nombre de Reynolds (Equació 6.2). Si aquest és major a 4000 el flux serà turbulent, pel contrari serà laminar.

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

On  $\rho$  és la densitat de cada fluid en  $\text{kg/m}^3$ ,  $D$  el diàmetre en m de la canonada que uneix el dipòsit amb el mesclador en metres,  $\mu$  la viscositat dinàmica de cada fluid en  $\text{kg/(m s)}$  i  $v$  la velocitat característica que cada fluid agafa dins la canonada en  $\text{m/s}$ , on aquesta última es calcula seguint la Equació 6.3, sent  $\dot{V}$  el cabal volumètric en  $\text{m}^3/\text{s}$  i  $D$  el diàmetre de la canonada en m.

$$v = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

La Taula 6.4 i la Taula 6.5 presenten un estudi del flux per a cada diferent combustible abans d'entrar al sistema mesclador de doble filtre per després poder determinar amb exactitud els paràmetres necessaris pel disseny del sistema. Ambdós combustibles es troben a 10 bar i temperatura de 20°C, i el cabal màssic respon a la composició per una mescla amb percentatge de substitució (GER) del 10% en el cas del dodecà i del 90% en el cas del GLP que suposen el cabal màxim que pot circular-hi de cada combustible.

Dodecà (a 10 bar)		
Densitat	750,15	kg/m <sup>3</sup>
Viscositat	0,001508	kg/(m·s)
Diàmetre	0,01	m
Velocitat	0,2950	m/s
Cabal volumètric	2,3165E-05	m <sup>3</sup> /s
Àrea canonada	7,8539E-05	m <sup>2</sup>
Número Reynolds	1468	

**Taula 6.4.** Propietats i número Reynolds del dodecà.

GLP (a 10 bar, 20°C)		
Densitat	558,55	kg/m <sup>3</sup>
Viscositat	0,00015264	kg/(m·s)
Diàmetre	0,006	m
Velocitat	1,10	m/s
Cabal volumètric	3,1112E-05	m <sup>3</sup> /s
Àrea canonada	2,8274E-05	m <sup>2</sup>
Número Reynolds	24159	

Taula 6.5. Propietats i número Reynolds del GLP.

A partir d'aquests càlculs i valors es fa el mateix per la mescla amb GER=30% i amb GER=70%. La viscositat dinàmica de la mescla s'ha calculat a partir d'un mètode de predicció basat en hidrocarburs purs. Un dels mètodes que presenta menys error absolut per mescla de hidrocarburs pesats i lleugers és el model Shu [18]. Es selecciona aquest degut a que involucra en la seva equació la densitat i la fracció volumètrica i al baix percentatge d'error relatiu:

$$\ln \mu_{mescla} = \frac{\alpha \cdot V_p}{\alpha \cdot V_p + V_L} \cdot \log \mu_p + \left( 1 - \frac{\alpha \cdot V_p}{\alpha \cdot V_p + V_L} \right) \cdot \log \mu_L \quad (\text{Eq. 6.4})$$

$$\alpha = \frac{17,04 \cdot ((\rho_p - \rho_L)^{0,5237} \rho_p^{3,2745} \rho_L^{1,6316})}{\ln \frac{\mu_p}{\mu_L}} \quad (\text{Eq. 6.5})$$



On:

$\mu_{mescla}$  = Viscositat dinàmica de la mescla. [kg/(m·s)]

$\mu_p$  = Viscositat dinàmica de l'element pesat. [kg/(m·s)]

$\mu_L$  = Viscositat dinàmica de l'element lleuger. [kg/(m·s)]

$V_p$  = Fracció volumètrica de l'element pesat.

$V_L$  = Fracció volumètrica de l'element lleuger.

$\rho_p$  = Densitat relativa de l'element pesat. [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_L$  = Densitat relativa de l'element lleuger. [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha$  = Constant empírica del model de Shu.

En la Figura 6.7 es veu representat, per una mescla amb factor de substitució del 70%, com varia la viscositat d'aquesta en funció de la temperatura a la que es troba exposada.

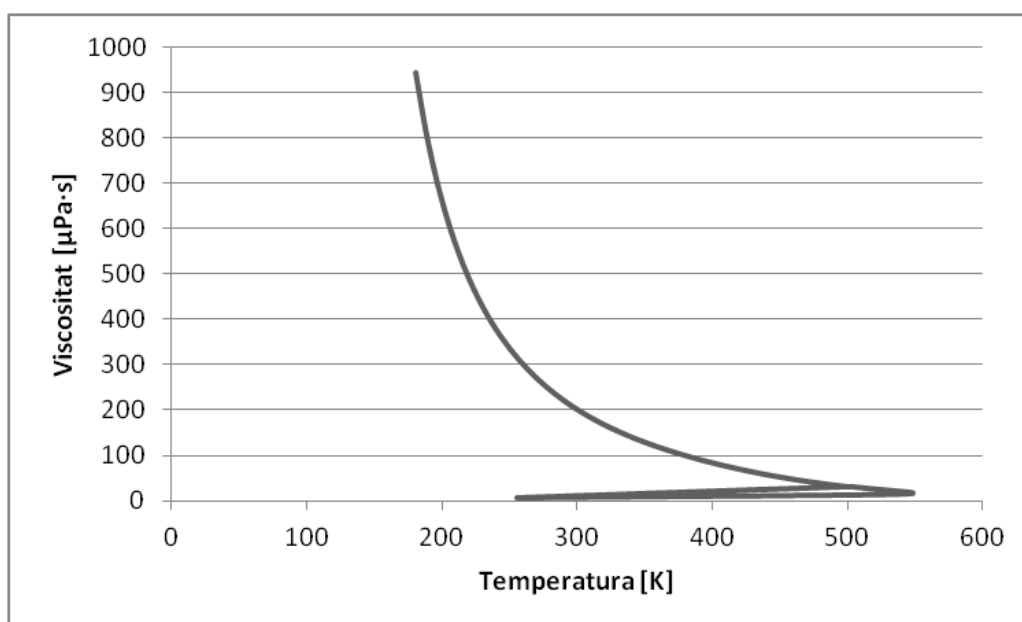


Figura 6.7. Viscositat en funció de la temperatura en una mescla amb GER=70%.

#### Mescla (a 10 bar i GER=30%)

Densitat	692,67	kg/m <sup>3</sup>
Viscositat	0,0595	kg/(m·s)
Cabal màssic	0,01931	kg/s

Taula 6.6. Propietats mescla amb GER=30%.

Mescla (a 10 bar i GER=70%)		
Densitat	616,03	kg/m <sup>3</sup>
Viscositat	0,0595	kg/(m·s)
Cabal màssic	0,01931	kg/s

Taula 6.7. Propietats amb GER=70%.

Es pot comprovar que la variació entre aquestes diferents variacions de percentatge de substitució són gairebé imperceptibles.

#### 6.1.2.1. Dimensionament filtres

A continuació, es calcularan les dimensions que han de tenir ambdós filtres. En el cas del dièsel, es calcularà el diàmetre mínim que hauria de tenir el filtre, és a dir, suposant que la mescla serà d'un 100% de dièsel. Agafant una altura del filtre de 75 mm, es troba el diàmetre mínim a partir de l'equació 6.6.

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot h \cdot \rho}} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

On D és el diàmetre del filtre en metres,  $\dot{m}$  és el cabal màssic en kg/s,  $\rho$  la densitat en kg/m<sup>3</sup> i h l'alçada del filtre en metres.

Cabal dièsel	0,01931	kg/s
Altura	75	mm
Diàmetre mínim	30	mm

Taula 6.8. Dimensions filtre dièsel.

Pel cas del GLP, en la Taula 6.9 figuren els cabals de cada combustible per una mescla amb GER=90% que és un dels possibles casos amb més presència de GLP tenint en compte que no es podria tenir

mai un GER del 100% ja que és necessari el dièsel per inflamar la mescla. D'igual manera que pel filtre de dièsel es calcularan les dimensions del filtre de GLP per aquesta composició.

<b>Cabal dièsel</b>	0,00193	kg/s
<b>Cabal GLP</b>	0,01738	kg/s
<b>Cabal mescla</b>	0,01931	kg/s

**Taula 6.9.** Cabals combustibles amb GER=90%.

<b>Altura</b>	75	Mm
<b>Diàmetre mínim</b>	33	mm

**Taula 6.10.** Dimensions filtre GLP.

Per comprovar si aquests diàmetres són acceptables pel sistema, es calcula la velocitat del fluid (Equació 6.3) i el nombre Reynolds (Equació 6.2) per així assegurar-se que el fluid segueix un règim laminar.

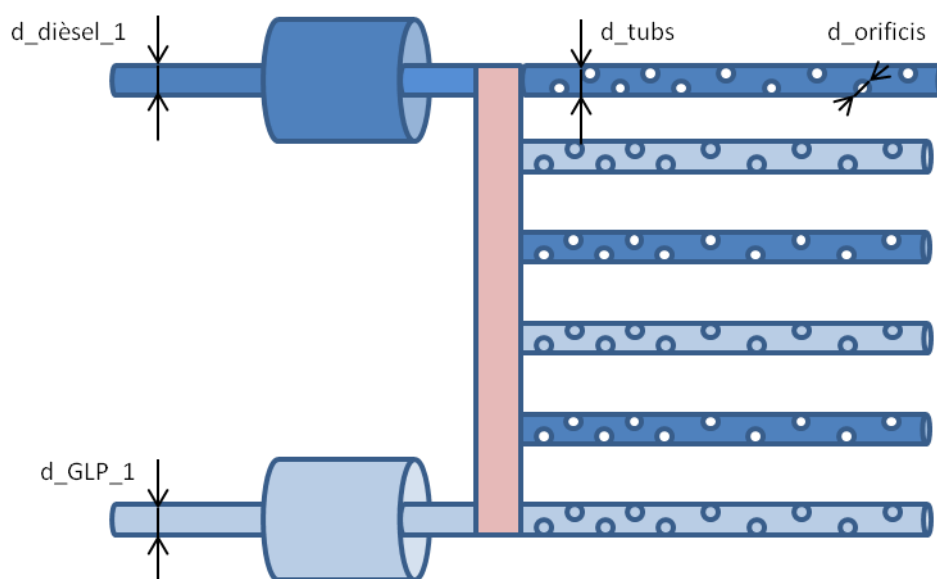
	<b>Dièsel</b>	<b>GLP</b>
<b>Velocitat</b>	0,03641 m/s	0,03638 m/s
<b>Reynolds</b>	536	4326

**Taula 6.11.** Velocitat i Reynolds del fluid dins el filtre.

Tal com es demostra en la Taula 6.11 el dièsel segueix un règim laminar i per tant s'accepten les seves dimensions proposades en la Taula 6.8. Ara bé, el GLP té un nombre de Reynolds de 4326 el qual es considera turbulent. No obstant, com el règim turbulent s'aconsegueix a partir d'un nombre Reynolds de 4000 es pot considerar un bon resultat i acceptar les mesures de la Taula 6.10.

### 6.1.2.2. Dimensionament mesclador

En aquest apartat caldrà determinar el nombre necessari de tubs encarregats de provocar la mescla i l'espaiat òptim entre aquests. També es determinarà els diàmetres que hauran de tenir aquests tubs i els diàmetres dels seus orificis. Com a premisses per trobar aquestes característiques es té que ha de ser un flux laminar, per tant ha de tenir una velocitat i un nombre de Reynolds baix, i que la caiguda de pressió que provocarà també haurà de ser la mínima.



**Figura 6.8.** Esquema filtre doble amb mesclador.

Es fa un estudi amb diferents nombre de tubs, per veure quins serien els diàmetres dels tubs i dels orificis a més de la seva velocitat, nombre de Reynolds i pèrdua de càrrega. S'escull la hipòtesi que els tubs tinguin una longitud de 0,1 metres i que cada tub tingui 250 orificis. Es considera una mescla amb GER=10% pel cas del dodecà i amb GER=90% pel cas del GLP.

El cabal màssic que passarà per cada tub serà calculat com mostra l'Equació 6.7, on  $\dot{m}_{total}$  és el cabal màssic total és la suma de cabals que passen pels filtres en  $m^3/s$  i  $n$  és el nombre de tubs.

$$\dot{m}_{tub} = \frac{\dot{m}_{total}}{n} \quad (\text{Eq. 6.7})$$

De la mateixa manera, el diàmetre de cada tub serà el diàmetre total en metres que sumen els dos filtres entre el nombre de tubs que hi hagi.

$$D_{tub} = \frac{D_{total}}{n} \quad (\text{Eq. 6.8})$$

La velocitat i el nombre de Reynolds serà calculat de la mateixa manera que en les equacions 6.2 i 6.3. La pèrdua de càrrega es trobarà a partir de l'Equació 6.9, sabent que es té un règim laminar tal com indica el nombre de Reynolds.

$$\Delta P = \rho \cdot f \cdot \frac{L \cdot v^2}{2D} \quad (\text{Eq. 6.9})$$

$\Delta P$  és la pèrdua de càrrega donada en  $\text{N/m}^2$ ,  $\rho$  la densitat en  $\text{kg/m}^3$ ,  $L$  la longitud en metres,  $v$  la velocitat en  $\text{m/s}$  i  $D$  el diàmetre en metres. El paràmetre  $f$  correspon al factor de fricció, i en un règim laminar pot ser calculat com indica l'equació 6.10:

$$f = \frac{R}{64} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Finalment, per calcular l'àrea de cada orifici serà necessari trobar l'àrea de la superfície dels tubs:

$$A_{s,tub} = \pi D L_{tub} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

$$A_{orifici} = \frac{A_{s,tub}}{2 \cdot n_{orificis}} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

On  $n_{orificis}$  representa el nombre d'orificis i el valor nombre 2 que multiplica aquest paràmetre pretén indicar els espais entre orificis. A correspon a l'àrea i és donada en  $\text{m}^2$ .

En la Taula 6.12 i Taula 6.13 es poden veure els resultats d'aquests càlculs:

Nombre tubs	Cabal màssic [kg/s]	Diàmetre [m]	Velocitat [m/s]	Reynolds	Pèrdua càrrega [N/m <sup>2</sup> ]	Diàmetre orifici [m]	Àrea <sub>orificis</sub> /Àrea <sub>total</sub> [%]
1	0,01738	0,0300	0,03277	489	0,01790	0,0049	20,01
2	0,00869	0,0150	0,06554	489	0,14320	0,0035	10,21
3	0,00579	0,0100	0,09832	489	0,48331	0,0028	6,53

4	0,00434	0,0075	0,13109	489	1,14561	0,0024	4,80
5	0,00348	0,0060	0,16386	489	2,23753	0,0022	4,03
6	0,00290	0,0050	0,19663	489	3,86645	0,0020	3,33
7	0,00248	0,0043	0,22941	489	6,13978	0,0019	3,00
8	0,00217	0,0038	0,26218	489	9,16492	0,0017	2,38
9	0,00193	0,0033	0,29495	489	13,04926	0,0016	2,15
10	0,00174	0,0030	0,32772	489	17,90023	0,0015	1,88

**Taula 6.12.** Dimensionament tubs dodecà amb longitud 0,1 metres i amb 250 orificis.

Nombre tubs	Cabal màssic [kg/s]	Diàmetre [m]	Velocitat [m/s]	Reynolds	Pèrdua càrrega [N/m <sup>2</sup> ]	Diàmetre orifici [m]	Àrea <sub>orificis</sub> /Àrea <sub>total</sub> [%]
1	0,01738	0,0330	0,03638	4393	0,00166	0,0051	19,70
2	0,00869	0,0165	0,07275	4393	0,01331	0,0036	9,82
3	0,00579	0,0110	0,10913	4393	0,04490	0,0030	6,82
4	0,00434	0,0083	0,14550	4393	0,10644	0,0026	5,09
5	0,00348	0,0066	0,18188	4393	0,20789	0,0023	4,01
6	0,00290	0,0055	0,21825	4393	0,35924	0,0021	3,34
7	0,00248	0,0047	0,25463	4393	0,57046	0,0019	2,74
8	0,00217	0,0041	0,29100	4393	0,85153	0,0018	2,47
9	0,00193	0,0037	0,32738	4393	1,21243	0,0017	2,17
10	0,00174	0,0033	0,36375	4393	1,66314	0,0016	1,94

**Taula 6.13.** Dimensionament tubs GLP amb longitud 0,1 metres i amb 250 orificis.

El nombre de tubs més òptim seria entre 2 i 4 tant pel dièsel com pel GLP ja que el valor dels seus diàmetres són els que més s'adaptarien. El diàmetre resultant dels seus orificis seria entre 1,5 i 3,0 mm que també es pot considerar com a bon resultat. Per aquest disseny es seleccionaran 6 tubs, 3 de dièsel amb un diàmetre de 10 mm i amb orificis de diàmetre 2,8 mm i 3 de GLP amb un diàmetre de 11 mm i amb orificis de diàmetre 3,0 mm.

Finalment, amb totes aquestes mesures calculades es pot concretar la mida global del mesclador amb doble filtre. L'alçada, sumant els diàmetres dels tubs i deixant un espaiat entre ells i entre el tub i la carcassa exterior del mesclador de la mida del diàmetre mateix del tub, serà de 133 mm. Si es sumen els diàmetres dels filtres es troba una alçada de 63 mm. Per tant s'escull l'alçada per la carcassa del mesclador amb doble filtre de 133 mm. La llargària serà resultat de la mesura dels tubs i dels filtres més un marge entre ells i la carcassa. Aquesta mesura resultarà ser de 200 mm.

[m]	
Alçada	0,133
Llargària	0,200

**Taula 6.14.** Mesures carcassa exterior del mesclador amb doble filtre.

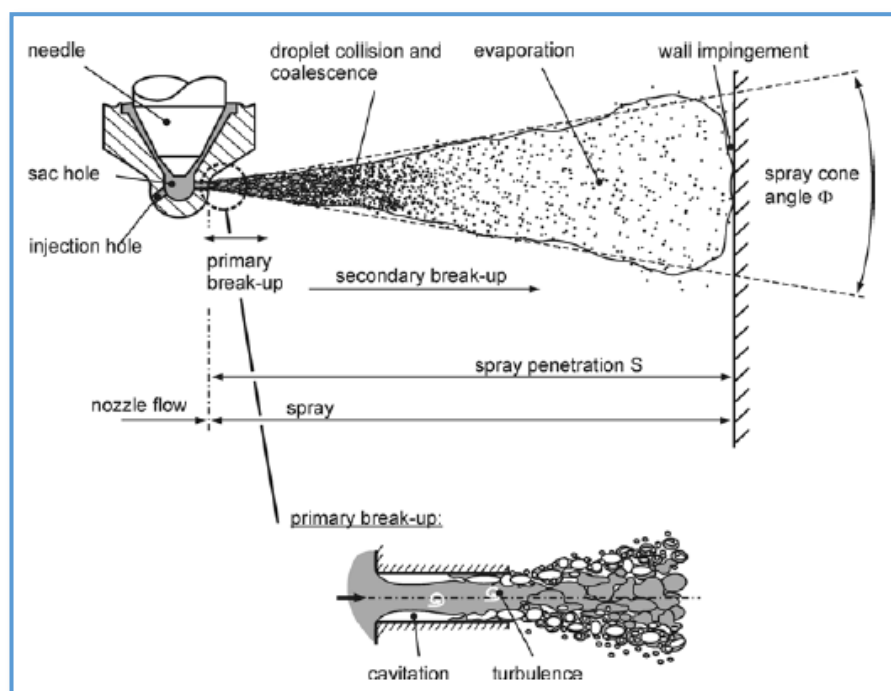
## 6.2. Sistema d'injecció

El sistema d'injecció és el responsable de l'entrega adequada de combustible al motor i en el temps adequat. Les etapes per les quals passa el raig del combustible al ser injectat són quatre: l'atomització primària, l'evaporació de combustible, la formació de la mescla i el retràs de la ignició. L'esprai de combustible a injectar surt de l'orifici de la tovera del injector, el raig del combustible líquid penetra en l'aire i s'atomitza en diverses gotes. Les gotes que es troben a la capa més externa de l'esprai són les que s'evaporen abans creant una mescla d'aire i combustible vaporitzat. Les velocitats més elevades es troben en l'interior del raig. Un cop l'esprai interactua i xoca amb les parets de la cambra de combustió, el flux té un moviment tangencial al llarg de la paret.

El sistema d'injecció Common Rail ha millorat clarament l'atomització del combustible ja que proporciona un alt grau de flexibilitat pel que fa a la pressió d'injecció i el temps d'injecció. Com a conseqüència, la eficiència del motor i les emissions contaminants també es veuen millorades ja que una atomització de combustible més fina permet un cremat més eficient del combustible, donant

com a resultat més rendiment energètic. Aquest fet s'atribueix al fet de que la combustió s'inicia a partir de la superfície de contacte entre el combustible i l'aire. Si es redueix la mida de les gotes de combustible, augmenta l'àrea superficial total per començar el procés de cremat, potenciant la eficàcia de la combustió i millorant les emissions. Així doncs la formació de la mescla s'optimitza en pressions d'injecció elevades i orificis petits de la tovera d'injecció. [12]

Una descripció esquemàtica del con sencer del raig a alta pressió és pot veure en la Figura 6.9.



**Figura 6.9.** Con sencer de l'esprai dièsel. [12]

En aquest apartat s'investiga quina és la pressió màxima a la que es pot portar el combustible per tal d'aconseguir el resultat explicat anteriorment, garantint unes condicions de seguretat òptimes. La temperatura a la que arriba el fluid en la compressió és el màxim condicionant per estudiar i seleccionar la pressió òptima de treball en el Common Rail. Quan el combustible es porta a una pressió elevada, la seva temperatura també es veu incrementada. Això pot portar com a conseqüència que, si la temperatura és suficientment alta, es poden desenvolupar reaccions químiques que poden produir l'autoencesa del combustible, o l'explosió d'aquest amb la mescla de l'aire. En la Taula 6.15 es poden veure les propietats principals dels combustibles utilitzats, com els límits d'explosió o temperatura d'auto ignició.



Propietats	GLP	Dièsel
Densitat	500 kg/m <sup>3</sup>	840 kg/m <sup>3</sup>
PCI	46,3 MJ/kg	42,5 MJ/kg
Punt d'ebullició	-43 °C	180 – 360 °C
Pressió de vapor	9,3 bar	<0,1 kPa a 40 °C
Límits d'explosió	2,1 - 9,4 %	6 - 6,5 %
Temperatura auto ignició	470 °C	250 °C

**Taula 6.15.** Propietats del dièsel i del GLP. [11]

Es suposa que la compressió duta a terme en la bomba HP és un procés isentròpic, reversible i adiabàtic. Ara bé, la realitat és que serà un procés no isentròpic, irreversible i diabàtic. Per poder calcular-ho de manera real, s'haurien de portar a terme experiments per determinar el rendiment isentròpic d'aquesta compressió. Amb aquest ja es podria saber quina és la entropia real del sistema.

Les irreversibilitats són inherents a tots els processos reals i el seu efecte és sempre la degradació del sistema. Al realitzar un anàlisi és desitjable examinar el grau de degradació de l'energia causada per les irreversibilitats en el sistema. Per això és necessari doncs, definir un procés ideal que serveixi com a model pels processos reals.

Com més s'apropi el procés real al ideal millor funcionarà el sistema. Per això és important disposar del rendiment isentròpic que expressa quantitativament com de eficaçment un dispositiu real s'acosta a un idealitzat. Així doncs, el rendiment isentròpic és una mesura de la desviació dels processos reals respecte als idealitzats. Aquest es podria definir com mostra la equació 6.13:

$$\eta_s = \frac{\Delta s_{ideal}}{\Delta s_{real}} \quad (\text{Eq. 6.13})$$

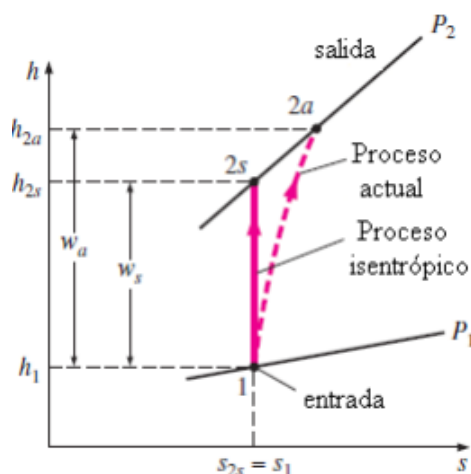
$\eta_s$  correspon al rendiment isentròpic i és un paràmetre adimensional, i  $\Delta s_{ideal}$  i  $\Delta s_{real}$  corresponen al increment d'entropia específica ideal i real, respectivament.

En la Figura 6.10 es pot veure un diagrama de la entalpia específica en funció de la entropia específica d'un procés de compressió, amb el punt ideal i també el real. Es pot veure perfectament com en cas

real la entropia específica és la mateixa en el punt 1 i en el punt 2, ara bé, en el cas real aquesta corba d'entropia es troba lleugerament desviada. La diferència entre aquests dos punts, és a dir la eficiència isentròpica, també pot ser calculada com la diferència de treball que realitza la bomba HP. El treball d'una bomba de líquids es pot calcular a partir de la equació 6.14. On  $w_b$  correspon al treball de la bomba en  $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $P_1$  i  $P_2$  a les pressions del punt 1 i del punt 2 respectivament en Pascals i  $\rho$  la densitat en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

$$w_b = - \frac{P_2 - P_1}{\rho} \quad (\text{Eq. 6.14})$$

$$\eta_s = \frac{w_{ideal}}{w_{real}} \quad (\text{Eq. 6.15})$$



**Figura 6.10.** Diagrama  $h$ - $s$  d'un procés ideal i real.

Així doncs en aquest projecte s'assumeix que és un procés ideal isentròpic podent així en el futur realitzar els experiments necessaris per saber el seu comportament real i per tant més exacte.

En la figura A3 de l'Annex A es pot veure el diagrama  $p$ - $T$  de la mescla de combustibles amb un GER del 70%. L'entropia específica d'aquesta mescla a 10 bar i una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  és de  $0,2 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ . Resseguint la línia de compressió isentròpica fins a la pressió desitjada es troba la temperatura del punt corresponent una vegada acabada l'etapa de compressió. En la Taula 6.16 es poden comprovar els valors obtinguts de temperatura a distintes pressions.

Pressió [bar]	Temperatura [K]
100	300,72
610	315,52
1010	322,60
1510	330,16
2010	336,67
2510	343,37

**Taula 6.16.** Valors de pressió i temperatura en la compressió. [16]

D'aquesta manera es pot comprovar que en cap cas es superarà la temperatura d'autoignició de cap dels dos combustibles, que en el cas del dièsel és de 523,15 K i en el cas del GLP de 743,15 K, i per tant es podrà operar de manera segura.

## 6.3. Combustió

### 6.3.1. Aportació d'aire

L'oxigen necessari per formar la mescla combustible es pren de l'aire atmosfèric. L'aire és un gas format per diversos components, sent els més importants d'ells el nitrogen i l'oxigen, que junts constitueixen un 98,7 % de la massa total. La composició de l'aire atmosfèric es mostra en la Taula 6.17.

Gas	% Volum	% Massa	Massa molecular [kg/Kmol]
N <sub>2</sub>	78,09	75,52	28,02
O <sub>2</sub>	20,95	23,15	32,00
Ar	0,93	1,28	39,95
CO <sub>2</sub>	0,03	0,05	44,01
Ne	0,0018	0,0012	20,18
He	0,0005	0,00007	4,00
Kr	0,0001	0,003	83,80
Xe	0,000009	0,00004	131,30
H <sub>2</sub>	0,00005	0,000004	2,02
Aire sec	100	100	28,96

**Taula 6.17.** Composició de l'aire sec.

En el cas de l'aire sec, la densitat es calcula en funció de la pressió i la temperatura atmosfèriques (Equació 6.16).

$$\rho(P, T) = 1,2928 \cdot \frac{P}{1013} \cdot \frac{273}{273 + T} \quad (\text{Eq. 6.16})$$

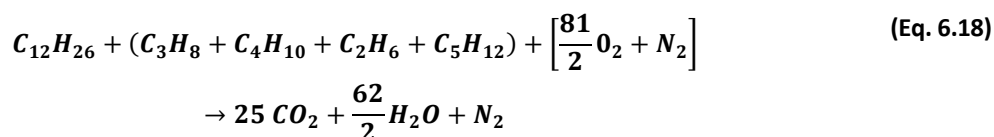
On P és la pressió en mbar, T la temperatura en °C i  $\rho$  la densitat en kg/m<sup>3</sup>.

Si es considera aire humit, la densitat es calcula en funció de la pressió de saturació de vapor ( $P_{sat}$ ), la pressió atmosfèrica (P) i la humitat relativa ( $h_{rel}$ ) seguint l'equació 6.17.

$$\rho_{humit} = \rho_{aire\ sec} \cdot \left( 1 - 0,378 \cdot h_{rel} \cdot \frac{P_{sat}}{P} \right) \quad (\text{Eq. 6.17})$$

### 6.3.2. Relació aire combustible estequiomètrica (RAC)

Es defineix relació aire combustible com el cabal màssic d'aire i de combustible estequiomètricament necessari per una combustió completa. La fórmula química de combustió completa, si es considera com a composició de l'aire solament l'oxigen i el nitrogen, és (Equació 6.18):



Aquesta reacció és ideal i generalment les reaccions de combustió no són completes i durant aquesta es formen altres espècies, com per exemple monòxid de carboni (CO), òxids de nitrogen (NO<sub>x</sub>), òxid de sofre (SO<sub>2</sub>), entre d'altres.

La relació aire combustible (RAC), doncs, es calcularà seguint l'equació 6.19.

$$RAC = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} = \frac{n_a \cdot M_a}{n_c \cdot M_c} = \frac{\frac{81}{2} \cdot 28,96}{1 \cdot M_c} \quad (\text{Eq. 6.19})$$

On  $M_a$  i  $M_c$  són les masses molars de l'aire (28,96 kg/Kmol) i del combustible. La massa molar del combustible variarà depenent de la composició de la mescla, és a dir depenent del paràmetre GER. La massa molecular del dièsel, considerant la seva composició com a dodecà (C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>) és de 172,26 kg/Kmol, i la del gas líquid del petroli, considerant la mescla agafada per aquest projecte és de 114,22 kg/Kmol. En la equació 6.20 es veu la relació que seguirà:

$$M_c = GER \cdot M_{GLP} + (1 - GER) \cdot M_{dièsel} \quad (\text{Eq. 6.20})$$

Seguint les hipòtesis plantejades en la Taula 6.3 les relacions aire combustible corresponents es troben recollides en la Taula 6.18.

GER [%]	M <sub>c</sub> [kg/Kmol]	RAC
10	101,95	11,5
15	99,25	11,82
20	96,56	12,15
25	93,87	12,49
30	91,18	12,86
35	88,49	13,25
40	85,79	13,69
50	80,41	14,59
60	75,03	15,63
70	69,64	16,84
80	64,26	18,25

**Taula 6.18.** Hipòtesis realitzades la relació aire combustible.

### 6.3.3. Methane Number

Un altre concepte a tenir en compte en la combustió és el Methane Number (NM). És un paràmetre que defineix el poder de detonació d'una barreja d'hidrocarburs. Normalment s'aplica en combustibles basats en hidrocarburs gasosos, com per exemple el Gas Natural, en Bio Gas, entre d'altres. El metà pur ( $\text{CH}_4$ ) té un poder de detonació de 100 MN, i en canvi, el hidrogen és un combustible fàcil de cremar i té definit el valor de 0 MN. Per tant, una mescla de hidrocarburs 80 MN és equivalent a un combustible amb una composició del 80% de metà i el 20% d'hidrogen.

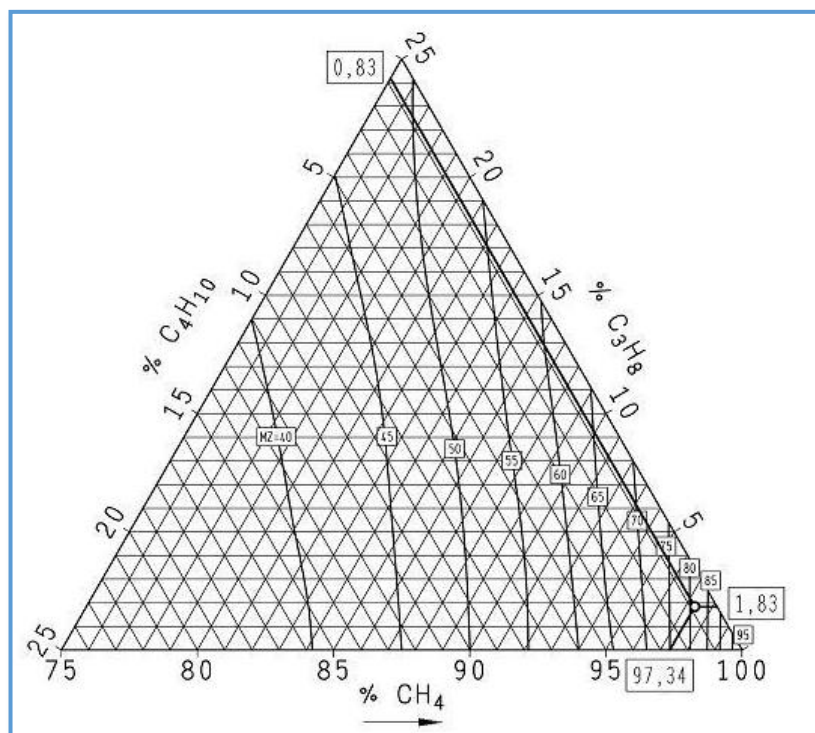
És cert que no hi ha cap estàndard per determinar el NM per mescles de gasos. No obstant, pràcticament tot el treball recent amb gasos es refereixen a l'estudi AVL. Aquest estudi es basa en una sèrie de dades determinades experimentalment mitjançant un motor de proves. Com a part d'un projecte de recerca es van determinar les corbes de progressió del nombre de metà per a un gran nombre de grups de dos o tres components del gas natural.

Per tal de calcular en NM de la barreja de gasos la mescla es subdivideix en mescles parcials. El NM de la mescla total resulta de la suma de les mescles parcials:

$$MN = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n y_i \cdot MN_i \quad (\text{Eq. 6.21})$$

On  $MN_i$  correspon al nombre de metà de la mescla parcial  $i$ ,  $y_i$  a la fracció percentual de la mescla parcial  $i$  i  $n$  al nombre total de mescles parcials. Si la fracció del gas inert present en la mescla del gas supera el 2% és necessari introduir una mesura correctiva.

Per trobar el NM d'una mescla, per exemple de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  i  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  amb les seves corresponents composicions, es fa a partir del diagrama de la Figura 6.11.



**Figura 6.11.** Diagrama per la determinació del NM d'una mescla de gasos. [19]

## 6.4. Separació dels combustibles

Del combustible que és enviat cap al motor no sempre se'n consumeix el 100%. Depenent de les necessitats instantànies del vehicle, el motor necessitarà més o menys combustible. La part de combustible no utilitzat ha de ser retornat cap al dipòsit. Aquest sobrant, al ser el resultat d'una mescla de dos combustibles diferents, han de ser separats per tal de retornar cadascun al seu dipòsit corresponent.

La separació és un procés físic en el qual una barreja es sotmet a algun tractament que la divideix en almenys dues substàncies diferents. En el procés de separació, les substàncies conserven la seva identitat, sense cap canvi en les seves propietats químiques. Entre les propietats físiques de les fases que s'aprofiten per a la seva separació, es troba el punt d'ebullició, la solubilitat, la densitat i altres més.

Per separar una mescla composta de dos fluids poden ser utilitzats diferents mètodes: la decantació, i la destil·lació. En general el mètode a utilitzar es defineix d'acord amb els tipus de components de la barreja i de les seves propietats particulars, així com les diferències més importants entre les fases.



- Decantació. La decantació s'utilitza per separar líquids immiscibles, és a dir que no es dissolen entre sí. L'aparell utilitzat s'anomena ampolla o embut de decantació. La decantació és el mètode de separació més senzill, i sol ser el preàmbul per a altres processos més complexos per aconseguir la major puresa possible. Per separar dues fases per mitjà de decantació, s'ha de deixar la mescla en repòs fins que la substància més densa es diposita en el fons. Després es deixa caure el líquid per l'aixeta, caient en un altre recipient, deixant dalt només un dels dos fluids.

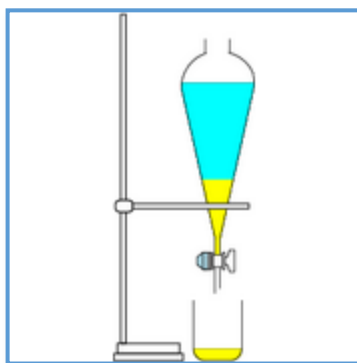


Figura 6.12. Embut decantació.

- Destil·lació. La destil·lació és una operació de separació tèrmica que s'utilitza per separar dos líquids miscibles amb punt d'ebullició diferents. El procés de destil·lació s'inicia a una determinada temperatura en la qual el líquid més volàtil de la mescla s'evapora, i l'altre queda en estat líquid. Llavors, la fase evaporada es recupera mitjançant condensació al disminuir la temperatura.

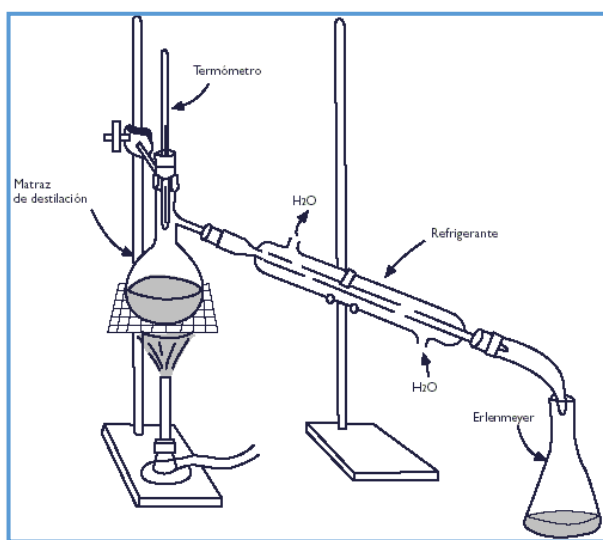
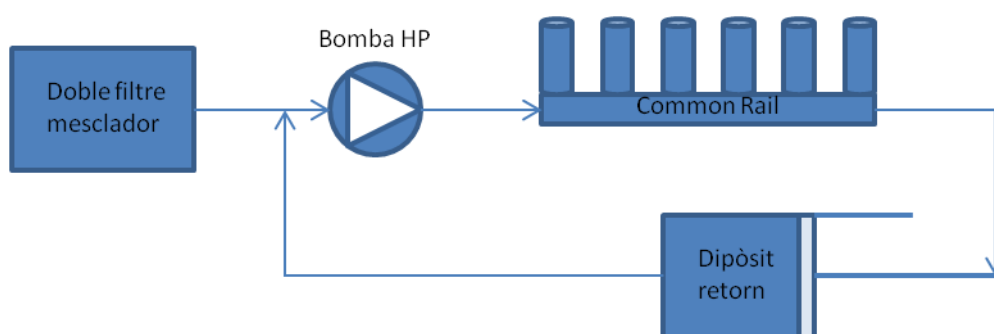


Figura 6.13. Columna destil·lació.

En el cas del GLP i el dièsel, al ser dues substàncies que s'han mesclat prèviament i conformen una mescla homogènia i a més tenen el seu canvi de fase en temperatures diferents es podria utilitzar el mètode de la destil·lació. A la sortida del CR, una vàlvula s'encarrega de baixar la pressió del combustible que no ha estat enviada cap als injectors fins a una pressió de 3,5 bar, en el cas del motor IVECO Cursor 10. El resultat de que la mescla es trobi a una pressió baixa seria que el dièsel es trobaria en fase líquida i el GLP en fase gas. A partir d'aquí, el dièsel es posicionaria a la part baixa de la columna de destil·lació i el GLP sortiria pel cap de la columna, fent així possible la seva separació. Ara bé, aquest mètode no és el més òptim per diferents motius. El GLP al sortir del separador hauria de patir una reliqüefacció per tornar a entrar en estat líquid al dipòsit, per això es necessitaria una petita planta dins el sistema. Existeixen plantes de reliqüefacció industrials i de grans mides, però no tan reduïdes i per estar dins un sistema mòbil. Aquest procés doncs, a banda de ser molt complicat degut a que s'estaria intentant un canvi de fase de gas a líquid que té una component d'energia requerida important, resultaria tenir un pes econòmic massa gran.

És per això que es planteja la possibilitat de que ambdós combustibles no retornin als seus dipòsits per separat sinó que siguin retornats conjuntament al sistema d'alimentació. El sistema a dissenyar constaria d'un petit dipòsit, d'estructura similar a un cilindre amb pistó, que aniria connectat a la sortida del CR del combustible no utilitzat. La pressió en aquesta sortida no seria reduïda fins a 3,5 bar com es fa normalment sinó que fins a 10 bar, evitant així que el GLP s'evapori i es plantegi el mateix problema que en el cas del separador. La idea de que el dipòsit sigui com un cilindre amb pistó és que així sempre s'assegurarà una pressió constant dins ell. El combustible s'aniria lliurant en aquest dipòsit i quan aquest estàs a capacitat màxima el sistema passaria a alimentar-se d'aquest combustible sobrant i no dels dipòsits. El dipòsit aniria connectat abans de la bomba HP, perquè aquesta augmentés la seva pressió per entrar directament als injectors. En el moment en que el dipòsit es trobés a un 15% de la seva capacitat, es tancaria el subministrament de combustible des del dipòsit de retorn i el motor es tornaria a alimentar dels dipòsits principals (mesclador amb doble filtre).

En la Figura 6.14 es pot veure un esquema general de com seria aquest sistema.



**Figura 6.14.** Esquema sistema de retorn.

Existeixen certes variables que s'han de tenir en compte pel disseny d'aquest dipòsit. Una d'elles és el percentatge de substitució. Aquest va variant depenent del consum del vehicle i per tant resulta ser un paràmetre que va canviant en cada moment. Per tant, una problemàtica que podria sorgir seria que dins del dipòsit de retorn anirien entrant quantitats de combustible amb un GER diferent i per tant com a resultat es tindria que el dipòsit aniria variant la seva composició i a l'hora d'alimentar-se d'aquest no es sap quina tindria. Un altre paràmetre necessari en el dimensionament és el volum mínim que hauria de tenir el dipòsit de retorn. També s'ha de considerar l'energia que caldria per fer moure el pistó per a mantenir la pressió al nivell adequat. L'estudi detallat d'aquests paràmetres no està dins l'abast d'aquest projecte, però presenta un nou focus de treball per a futures investigacions.

## Conclusions

Una transició completa dels vehicles amb combustible d'origen fòssil cap al subministrament 100% elèctric no és possible a dia d'avui, i menys en el cas del HDV. Resulten necessàries una gran potència i una gran autonomia que la tecnologia actual no és capaç de proporcionar, a més d'ampliar i millorar la infraestructura. Així doncs la tecnologia dual-fuel pot tenir un gran potencial d'aquí a que la tecnologia permeti evolucionar cap a una solució sense combustibles fòssils. Per aquest motiu a dia d'avui la indústria Oil & Gas es podria dir que és la més important i la que disposa de més riquesa, infraestructura i poder. No obstant això presenta riscos. Un gran risc és el seu esgotament, que segons La Revista Estadística d'Energia Mundial de 2016 editada per la companyia BP (*The BP Statistical Review of World Energy* 2016) la vida útil esperada de les reserves és de 115 anys per la producció del carbó i aproximadament de 50 anys pel petroli i gas natural. Un altre gran risc és l'impacte ambiental que aquest deixa i per tant la forta regulació que s'imposarà sobre les tecnologies alimentades per petroli o gas.

El sistema dissenyat està compost pel doble filtre amb mesclador que filtra i barreja adequadament els dos combustibles, dièsel i GLP. Aquest està format pel filtre de dièsel, amb un diàmetre interior de 30 mm i una alçada de 75 mm, i pel filtre de GLP, amb diàmetre interior de 33 mm i una alçada també de 75 mm. D'aquests filtres el combustible va a parar a un col·lector i des d'aquest es distribueix per tubs de 100 mm de llargària: 3 tubs de diàmetre 10 mm pel cas del combustible dièsel i 3 tubs més de diàmetre 11 mm pel cas del combustible GLP. Els combustibles surten del tubs a través d'orificis, de 2,8 mm en els tubs dièsel i de 3,0 mm en els tubs GLP, i ja barrejats surten cap a la bomba HP. Les dimensions finals del sistema són de 0,133 x 0,200 metres.

El sistema d'injecció podrà operar a altes pressions, com un motor convencional, ja que la barreja no explotarà ni es descompondrà. Quan es faci un primer muntatge del sistema i es duguin a terme assajos experimentals es podrà determinar el rendiment isentròpic de la compressió en el sistema d'injecció i per tant es podrà determinar de manera més exacte el seu comportament.

El sistema de retorn tindrà una vàlvula calibrada a 10 bar i el combustible a aquesta pressió serà enviat a un dipòsit en forma de cilindre amb pistó que quan aquest es trobi al 100% de la seva capacitat el motor passarà a alimentar-se d'aquest sobrant de combustible fins que arribi a una capacitat del 15%.

De cara al futur, es podria dissenyar un banc d'experiments per portar a terme una investigació més detallada del sistema, introduir millores i estudiar la seva viabilitat real.

## Pressupost

En aquest apartat s'analitza el pressupost desglossat i agrupat per capítols, incloent la mesura dels mitjans emprats i la valoració econòmica dels mateixos. Com que no s'ha realitzat un banc per realitzar assajos experimentals del sistema dissenyat en l'anàlisi econòmica només s'hi veuran reflectits els costos d'enginyeria i els materials utilitzats.

## Costos d'enginyeria

Els costos de mà d'obra es desglossen segons la tasca realitzada. Els costos de planificació corresponen a les hores que s'han dedicat a la distribució del temps per cada tasca a més de definir de manera clara els objectius i l'estructura del projecte. La fase de documentació correspon al temps emprat per adquirir o consolidar els coneixements necessaris per la realització del disseny. Els costos corresponents a l'estudi són els més grans ja que és la tasca que més temps ha requerit. És la part on s'ha ideat el sistema i on s'ha desenvolupat tot el disseny. Finalment els costos de la memòria són aquells derivats de la redacció del document, incloent el marc teòric, l'explicació del disseny i les conclusions i pressupost. S'escull un honorari, d'enginyer junior, de 20 € l'hora.

Planificació	20 h	400,00 €
Documentació	100 h	2.000,00 €
Estudi	400 h	8.000,00 €
Memòria	80 h	1.600,00 €
Impostos: 21% d'IVA		2.520,00 €
<b>TOTAL COST ENGINYERIA</b>		<b>14.520,00 €</b>

**Taula P1.** Costos enginyeria desglossats per tasques.

## Materials

En aquest capítol s'inclouen els costos dels materials que s'han utilitzat durant la redacció d'aquest projecte, com per exemple els costos de la impressió de documents o de la primera versió del projecte per a la correcció final, a més de l'ordinador emprat i la impressió final.

Impressions parcials	100 pàgines	0,05 €/pàg	5 €
Ordinador	800 €	¼ ús	200 €
Impressió final	89 pàgines	0,2 €/pàg	17,80 €
Enquadernació amb tapa	-	-	5 €
TOTAL COSTOS MATERIALS			<b>227,80 €</b>

**Taula P2.** Costos desglossats dels materials utilitzats.

## Cost total

Finalment, en aquest últim capítol s'hi pot veure representat el cost total del projecte, format pels dos capítols desglossats anteriorment. Es comprova que la mà d'obra suposa el cost més elevat en tot el projecte.

Costos d'enginyeria	14.520,00 €
Costos materials	227,80 €
<b>COST TOTAL</b>	<b>14.747,80 €</b>

**Taula P3.** Cost total.

El pressupost del projecte resulta ser de:

**Catorze mil set cents quaranta-set euros amb vuitanta cèntims.**

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] Servicio Geológico Mexicano. "Yacimientos petroleros."  
[http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Yacimientos-petroleros.html](http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-petroleros.html)
- [2] Industria Petrolera. "Impacto ambiental que origina el petróleo y los entes que intervienen en el momento de una afectación de este tipo." Març 13, 2011.  
<https://www.lacomunidadpetrolera.com/2011/03/impacto-ambiental-que-origina-el-petroleo-y-los-entes-que-intervienen-en-el-momento-de-una-afectacion-de-este-tipo.html>
- [3] BP. "Statistical Review of World Energy", (2016).  
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [4] CIA - The World Factbook, "Country comparison: oil-proved reserves".  
[www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2244rank.html](http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2244rank.html)
- [5] Research Gate. "Curva de Hubbert". Novembre 2016.  
[https://www.researchgate.net/figure/Curva-de-Hubbert-expresando-el-pico-y-declive-de-la-produccion-petrolifera-mundial-El\\_fig7\\_321155197](https://www.researchgate.net/figure/Curva-de-Hubbert-expresando-el-pico-y-declive-de-la-produccion-petrolifera-mundial-El_fig7_321155197)
- [6] Bennett, Sean. *Modern Diesel Technology*, 2010.
- [7] Agència Europea del Medi Ambient. "Transport."  
<https://www.eea.europa.eu/es/themes/transport/intro>
- [8] Unió Europea. "Regulació CE 595/2009 del Parlament Europeu i del Consell." 18 Juny, 2009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1557997413878&uri=CELEX:32009R0595>
- [9] Ministeri per la transició ecològica, Govern d'Espanya. "Normativa espanyola sobre la qualitat del l'aire."
- [10] H.H. Pulkrabek. *Handbook Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines*. 2003.
- [11] Hua Zhao. *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development Diesel Engines*. 2010.
- [12] Mayinger, F. *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. n.d.

- [13] Ghazi, A Karim. *Dual-Fuel Diesel Engines*, 2015.
- [14] Wärtsilä. "Methane Number Calculator." <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/methane-number-calculator>
- [15] IVECO. Fulla tècnica Motor Cursor 10.
- [16] Software Refprop.
- [17] Bosch. "Filtres combustible". [http://es.bosch-automotive.com/es/internet/parts/parts\\_and\\_accessories/service\\_parts\\_1/filters\\_1/filters\\_1.html](http://es.bosch-automotive.com/es/internet/parts/parts_and_accessories/service_parts_1/filters_1/filters_1.html)
- [18] Perez, Angel. "Método de cálculo para la determinación de la viscosidad de mezclas de crudo pesado y extrapesado con crudo ligero." Febrer 21, 2014. <https://cayrosgroup.com/metodo-de-calculo-para-la-determinacion-de-la-viscosidad-de-mezclas-de-crudo-pesado-y-extrapesado-con-crudo-ligero-perez/>
- [19] Paola Comotti. "GLP e numero di metano". Divisione Stazione Sperimentale per i combustibili. Innovhub-Stazioni Sperimentali per l'Industria. 13 Novembre 2013.
- [20] Ingelibre. "Ciclos Otto y Diesel". 9 d'Abril 2014. <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/09/ciclos-otto-y-diesel-analisis-termodinamico/>

## Bibliografia complementària

- Lpi, Can. "Liquid Phase Autogas System Technology Vialle System."
- Vila Preseguer, Nil. "Estudi i caracterització CFD d'injectors de gas dual-fuel en MCI heavy-duty." TFG, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- Hendrick C. Van Ness i Michael M. Abbott. *Perry's Chemical Engineers*. 8a edició. 2008.
- Pham, Phuong Xuan. "Comparison of Liquid and Gaseous Liquefied Petroleum Gas Injection in a Spark Ignition Engine Pham." Thesis Submitted for the Degree of Master of Engineering Science", The University of Melbourne, 2015.
- R.J. Clews. *Project Finance for the International Petroleum Industry*. 2016.
- Andersen, P. "Algorithm for Methane Number Determination for Natural Gasses," no. June 29 1999, [http://www.dgc.dk/sites/default/files/filer/publikationer/R9907\\_algorithm\\_methane](http://www.dgc.dk/sites/default/files/filer/publikationer/R9907_algorithm_methane).
- Comotti, Paola. *Aspetti Generali Del GNL*, 2014.
- Liebherr. *High-Performance and Fuel-Efficient Common Rail Systems by Liebherr*. n.d



## Annex A: Diagrames termodinàmics

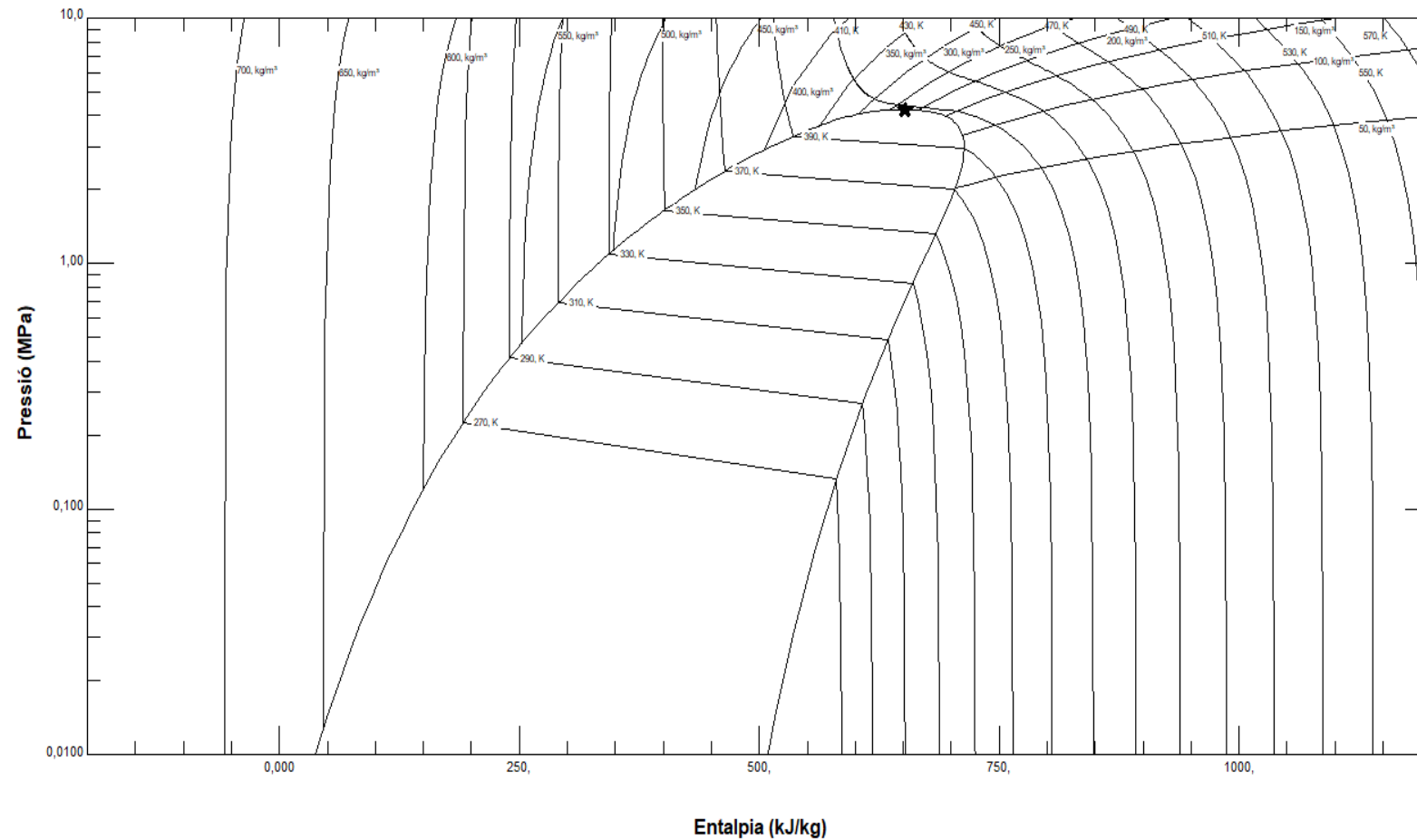
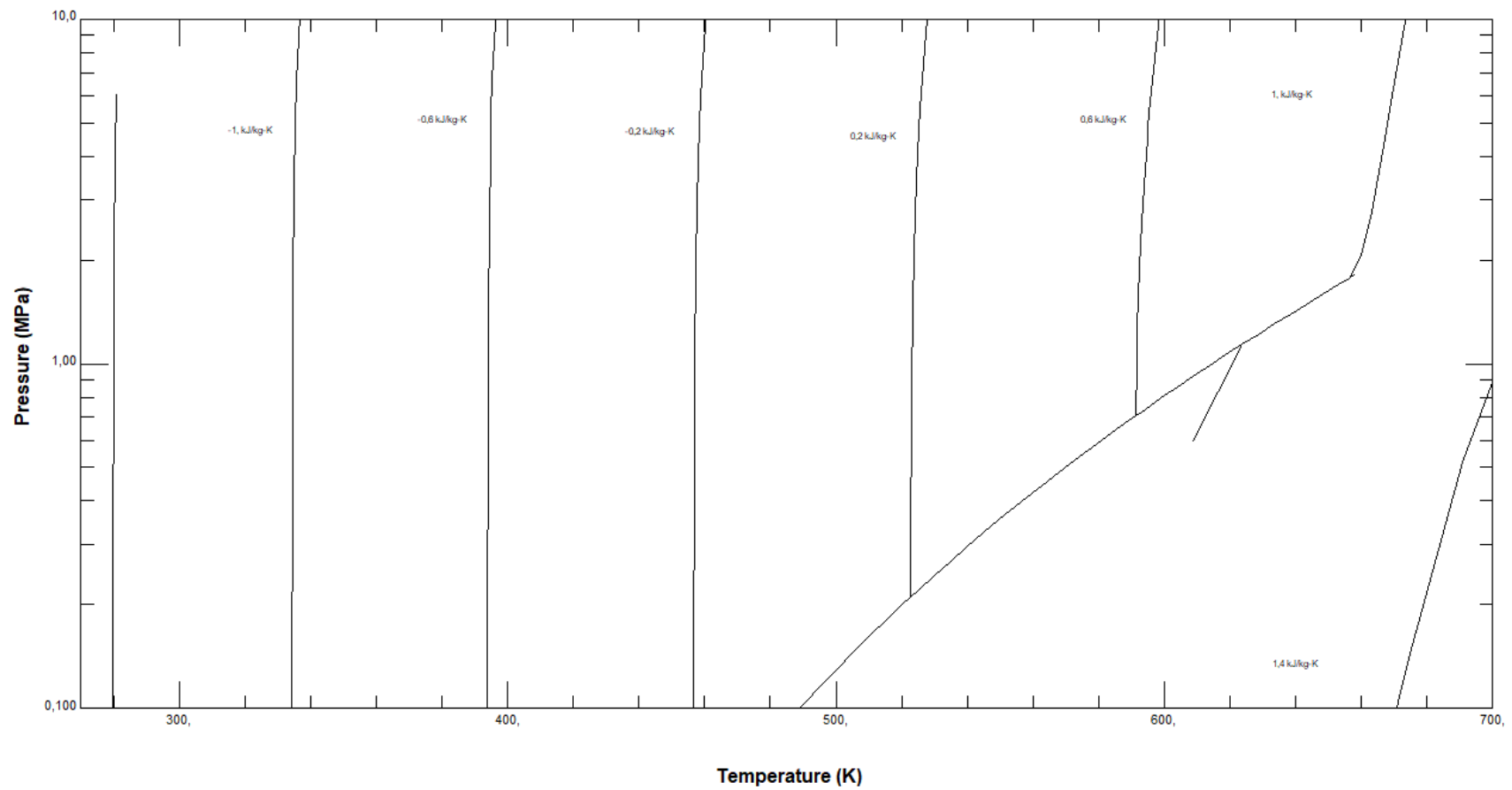


Figura A1. Diagrama ph del GLP. [16]



**Figura A2.** Diagrama pT del dodecà. [16]

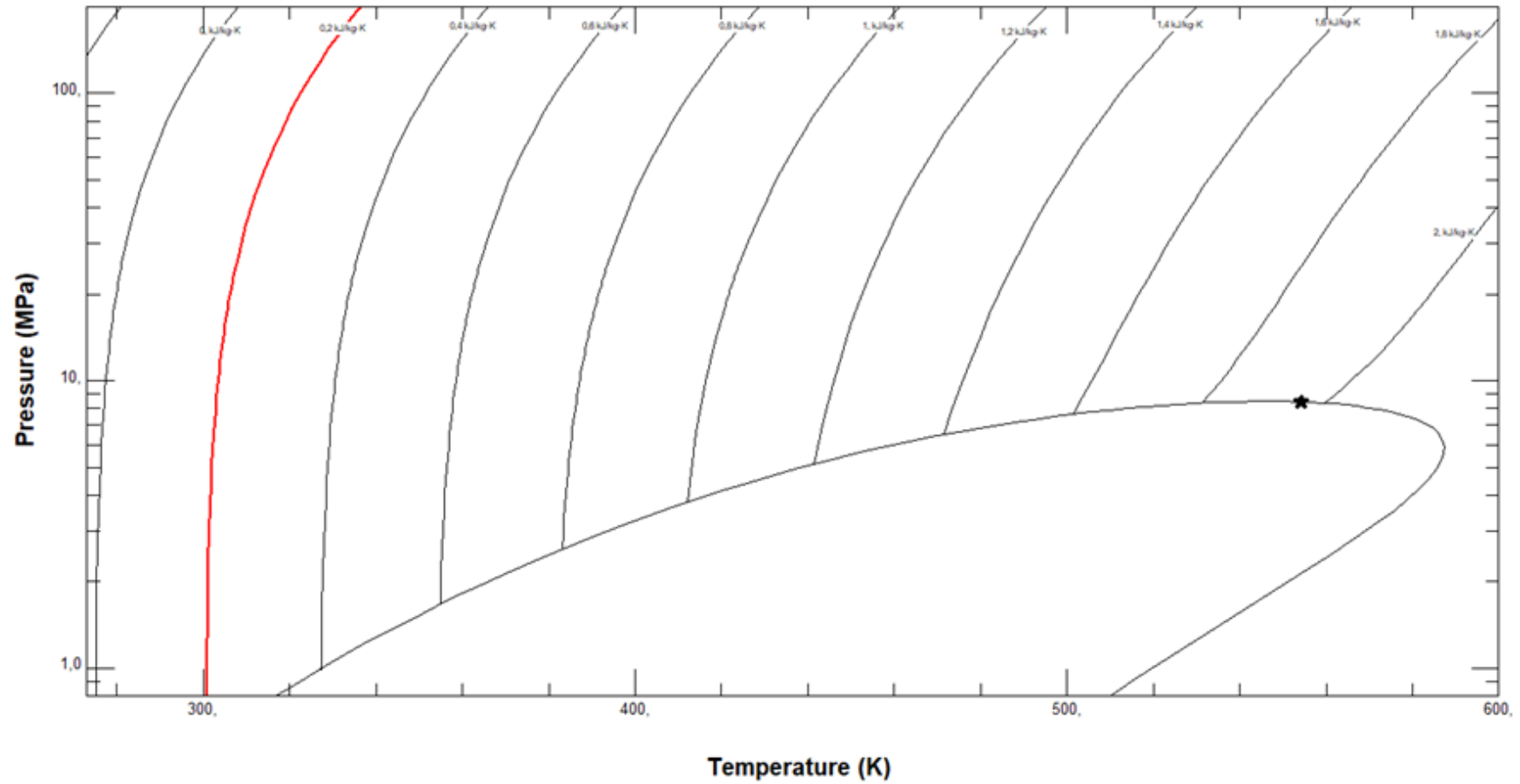


Figura A3. Diagrama pT mescla dièsel i GLP amb GER=70%. [16]